



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MĚŘENÍ TOLERANČNÍHO POLE A Vlivu DVOJLOMU NA
ČINNOST POLARIZAČNÍHO MULTIPLEXU**

TOLERANCE ZONE AND BIREFRINGENCE INFLUENCE MEASUREMENT ON POLARIZATION MULTIPLEX

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Štohl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Jakub Štohl

ID: 164420

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měření tolerančního pole a vlivu dvojlomu na činnost polarizačního multiplexu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Práce se zabývá možnostmi použití obou polarizačních rovin jako samostatných přenosových kanálů a zkoumá vliv dvojlomu na činnost polarizačního multiplexu. Součástí práce je návrh měřicího pracoviště a jeho realizace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLETT, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením tolerančního pole a vlivem dvojlomu na činnost polarizačního multiplexu. V teoretické části se věnuje polarizaci světla, matematickému popisu pomocí Stokesových a Jonesových vektorů a její reprezentaci pomocí Poincarého koule. Dále se věnuje optickému přenosu a slučování kanálů. Závěrečná část popisuje navržené měřicí pracoviště a samotné měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizace, Stokesovy vektory, Jonesovy vektory, Muellerovy matice, Polarizační multiplex, Poincarého koule, Dvojlom, Toleranční pole

ABSTRAKT

The thesis deals with the measurement of tolerance zone and the influence of birefringence on the activity of polarization multiplex. The theoretical part deals with polarization of light, mathematical description using Stokes and Jones vectors and its representation by Poincaré sphere. It also deals with optical transmission and channel merging. The final part describes the designed measuring workplace and the measurement itself.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarization, Stokes vectors, Jones vectors, Mueller matrix, polarization multiplex Poincaré sphere, birefringence, tolerance zone

ŠTOHL, Jakub. *Měření tolerančního pole a vlivu dvojlomu na činnost polarizačního multiplexu*. Brno, Rok, 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření tolerančního pole a vlivu dvojlomu na činnost polarizačního multiplexu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. a konzultantovi Ing. Martinu Kyselákovi, Phd. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Šíření světla a jeho polarizace	12
1.1 Eliptická polarizace	13
1.2 Kruhová polarizace	15
1.3 Lineární polarizace	15
1.4 Poincarého koule	16
1.5 Stokesovy polarizační parametry	17
1.5.1 Muellerovy matice	19
1.5.2 Jonesův maticový počet	21
2 Optický přenos	23
2.1 Optická vlákna, jevy ve vláknu	23
2.1.1 Mnohavidová vlákna	24
2.1.2 Jednovidová vlákna	24
2.1.3 Dvojlom ve vláknu	24
2.1.4 Polarizaci zachovávající vlákna	27
2.2 Slučování kanálů v optických sítích	28
2.2.1 Časový multiplex	29
2.2.2 Vlnový multiplex	29
2.2.3 Polarizační multiplex	31
2.3 Modulace v optických sítích	32
2.3.1 Klíčování fázovým posuvem	33
2.3.2 Kvadraturní amplitudová modulace	34
2.3.3 Modulace využívající polarizační multiplex	35
3 Realizace polarizačního multiplexu	38
3.1 Síťové prvky v zapojení	39
3.1.1 Zdroj signálu	39
3.1.2 Optická vlákna	39
3.1.3 Polarizační kontrolér	40
3.1.4 Polarizační dělič	40
3.1.5 Dělič výkonu	41
3.1.6 Polarimetrie	41
3.1.7 Úhlový posuvník	42
3.2 Ověření funkčnosti polarizačního multiplexu a měření krátké trasy . .	42
3.3 Měření dlouhých tras	48

3.3.1	Zapojení pro trasu o délce 2 km	48
3.3.2	Zapojení pro trasu o délce 5 km	51
3.3.3	Zapojení pro trasu o délce 10 km	53
3.4	Zhodnocení výsledků	56
4	Závěr	58
	Literatura	60
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	63
	Seznam příloh	64
A	Měření tolerančního pole s využitím polarimetru PAX1000IR2/M	65
A.1	Trasa s vláknem o délce 1 m	65
A.2	Trasa s vláknem o délce 2 km	66
A.3	Trasa s vláknem o délce 5 km	67
A.4	Trasa s vláknem o délce 10 km	68
B	Zapojení měřicího pracoviště	69
C	Obsah přiloženého CD	70

Seznam obrázků

1.1	Odraz světla od skleněné desky [1].	13
1.2	Dvě složky elektrického pole [1].	13
1.3	Polarizační elipsa [5].	14
1.4	Stavy polarizace v různých kombinacích amplitudy a fáze [5].	15
1.5	Poincarého koule v kartézském souřadnicovém systému[1].	16
1.6	Polarizační stavy[5].	17
1.7	Křížené polarizátory[1].	21
2.1	Úplný odraz ve vláknu[8].	23
2.2	Jednovidové vlákno[10].	25
2.3	Časový rozdíl šíření světla[14].	25
2.4	Tři typy PMF vláken [17].	27
2.5	Polarizační přeslech [18].	28
2.6	Zdroje polarizačního přeslechu[25].	29
2.7	Vlnové délky CWDM [20].	30
2.8	Základní schéma polarizačního multiplexu[22].	31
2.9	Polarizační dělič[8].	32
2.10	Polarizační kontrolér[22].	33
2.11	Konstelační diagram pro QPSK modulaci[8].	33
2.12	Konstelační diagram pro mQAM modulace[8].	34
2.13	PM-QPSK vysílač[23].	36
2.14	PM-QPSK přijímač[23].	36
2.15	PM-16QAM vysílač[23].	37
3.1	Blokové schéma měřicího pracoviště	38
3.2	Zapojení pracoviště z pohledu sítě	38
3.3	Média-konvertor TP-Link MC220L[28]	39
3.4	SFP modul TP-Link SM321[28]	40
3.5	Polarizační kontrolér[29]	40
3.6	Polarizační dělič	41
3.7	Polarimetr typu PAX5710IR3 (vlevo) a PAX1000IR2/M (vpravo)[29]	42
3.8	Úhlový posuvník Newport FPR1-C1A s optickým členem FPH-CA4[30]	42
3.9	Zapojení pro referenční měření	43
3.10	Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 1 m	46
3.11	Grafické prostředí PAX5710IR3 a LHP	47
3.12	Grafické prostředí PAX1000IR2/M a LHP	47
3.13	Zapojení pro měření s SM vláknem o délce 2 km/5 km/10 km	48
3.14	Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 2 km	49

3.15 Stav polarizace ve vlákně - maximální úhel $-52,5^\circ$ při kterém je PM u PC 1 funkční	51
3.16 Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 5 km	53
3.17 Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 10 km	55
3.18 Závislost DOP na úhlu natočení pro PAX5710IR3	56
3.19 Závislost DOP na úhlu natočení pro PAX1000IR2/M	57
A.1 Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 1 m	65
A.2 Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 2 km	66
A.3 Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 5 km	67
A.4 Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 10 km	68
B.1 Zapojení měřicího pracoviště	69
B.2 Zapojení měřicího pracoviště	69

Seznam tabulek

2.1	Nominální vlnové délky při 20 nm kanálové rozteči.	30
3.1	Přehled optických členů	43
3.2	Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 1 m	45
3.3	Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 2 km	50
3.4	Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 5 km	52
3.5	Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 10 km	54

Úvod

Optické sítě jsou v dnešní době velmi populární, zejména kvůli vysokým přenosovým rychlostem, které poskytují. S narůstající poptávkou je ale nutné vyřešit zvyšující se požadavky. Pokládka nových tras je finančně velmi náročná a proto se využívají různé techniky pro zvětšení přenosového pásma, jako slučování kanálu založené na časovém, vlnovém nebo polarizačním multiplexu.

V teoretické části diplomové práce popíšeme základy šíření světla, druhy polarizace a její reprezentaci pomocí Poincarého koule a definujeme je z matematického hlediska pomocí Muellerovy matice a s využitím Jonesova maticového počtu.

Druhá část se bude věnovat samotnému optickému přenosu, kde popíšeme základní druhy optických vláken, principy slučování kanálu a modulace využívané v optických sítích.

Poslední část diplomové práce se bude věnovat realizaci polarizačního multiplexu pro různé druhy délky vlákna, měření tolerančního pole a popisu jednotlivých zařízení a součástek, které budeme využívat.

1 Šíření světla a jeho polarizace

Světlo je elektromagnetické záření s viditelnou částí spektra o vlnové délce 390 nm až 750 nm, přičemž v této práci bude jeho popis zaměřen zejména na vlnovou povahu. Tvoří ho dva na sebe kolmé vektory intenzity elektrického pole a vektor magnetické indukce, které kmitají ve směru kolmém na směr šíření světla - příčné elektromagnetické vlnění.[3]

Obecně charakterizuje elektromagnetické vlnění jeho intenzita, spektrum (vlnová délka resp. frekvence) a polarizace (výslední vektor elektrického pole). První pokus o popis jevu polarizace učinil dánský matematik *Bartholius* v roce 1669, kdy zjistil, že světelný paprsek se po dopadu na islandský vápenec rozloží na dva podružné paprsky lomené pod dvěma různými úhly. Pozorování doplnil *Huygens*, který rotací druhého krystalu zvyšoval intenzitu jednoho paprsku na maximální hodnotu, přičemž druhý vymizel. Při 45° natočení byly intenzity obou paprsků stejné[4].

V roce 1808 se polarizací zabýval francouzský matematik a fyzik *Malus*, který při pokusu se světlem odraženým skleněnou deskou objevil závislost intenzity světla polarizovaného v rovnoběžném směru s deskou, od které se odrazilo na úhlu, pod kterým světlo na desku dopadlo. Světelný paprsek lomený je potom polarizován ve směru kolmém. [4].

Také definoval vztah pro výpočet intenzity odraženého polarizovaného světla, tzv. Malusův zákon.

$$I(\phi) = I_0 \cos^2 \phi, [1] \quad (1.1)$$

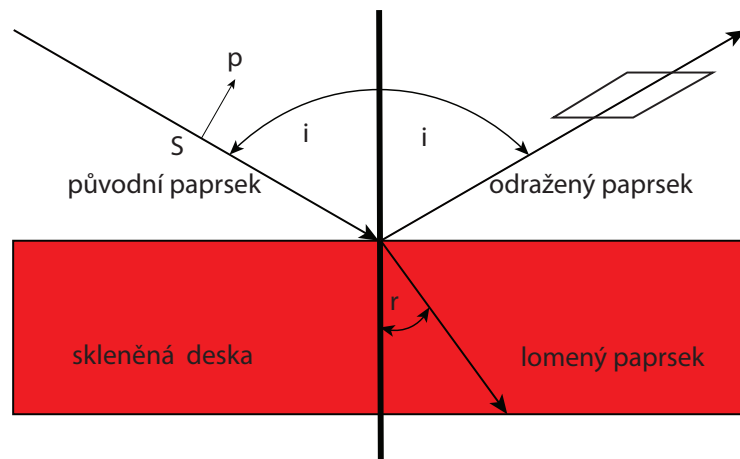
kde I_0 odpovídá intenzitě při nulovém natočení osy propustnosti vzhledem ke směru polarizace. Později v roce 1812 zjistil skotský fyzik *Brewster*, že pokud odražený a lomený paprsek svírají mezi sebou pravý úhel, tak je odražený paprsek zcela lineárně polarizovaný[4]. Na obr.1.1 je vidět odraz a lom světelného paprsku na skleněnou desku. Snellův zákon lomu světla je definován:

$$n_1 \sin(\phi_1) = n_2 \sin(\phi_2), [1] \quad (1.2)$$

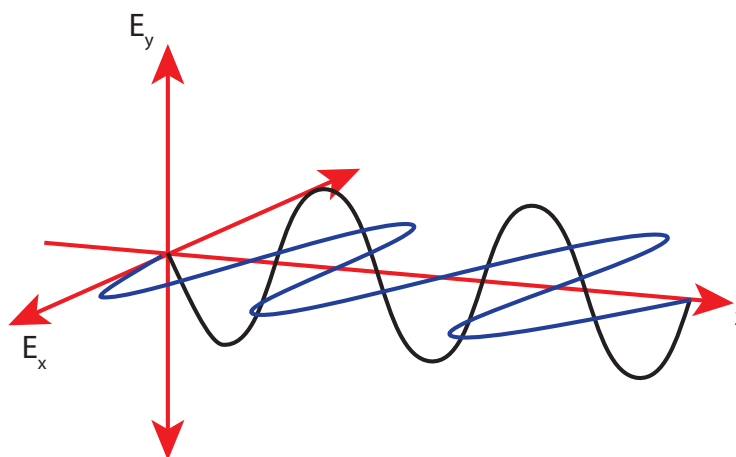
kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu dvou prostředí a úhly ϕ_1 a ϕ_2 jsou úhly dopadu a lomu. Úplný odraz nastane pokud je úhel dopadu roven tzv. meznímu úhlu ϕ_m - Brewsterův zákon:

$$\tan(\phi_m) = \frac{n_2}{n_1} [1] \quad (1.3)$$

Kompletně popsat světelné jevy - interferenci, difrakci a polarizaci se podařilo v roce 1821 francouzskému fyzikovi *Fresnelovi*, který se také zasloužil o konec částicové teorie. Předpokládal, že světlo se skládá ze dvou složek, dnes víme, že se jedná o složky elektrického pole - viz obr. 1.2. Výsledné rovnice popisují vektory elektrického pole ve směru osy x a y v čase:



Obr. 1.1: Odraz světla od skleněné desky [1].



Obr. 1.2: Dvě složky elektrického pole [1].

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x), \quad (1.4)$$

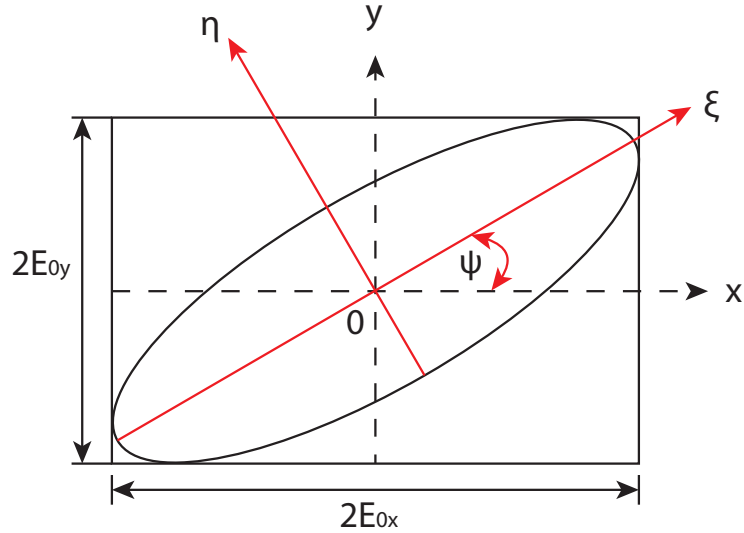
$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (1.5)$$

kde E_{0x} a E_{0y} jsou okamžité amplitudy os x a y , $\omega = 2\pi f$ je úhlová frekvence, $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo a δ_x resp. δ_y jsou fáze. $\omega t - kz$ se potom nazývá propagátor.

1.1 Eliptická polarizace

Pozorováním koncového bodu vektoru \mathbf{E} v prostoru a čase zjistíme, že tento bod opisuje obecně elipsu xy - viz obr. 1.3.

Fresnelova teorie popisuje kmitání vektoru \mathbf{E} podle funkce sinus. Z předcházejících rovnic můžeme díky eliminaci časově-prostorového členu - propagátoru definovat



Obr. 1.3: Polarizační elipsa [5].

rovnici elipsy.

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.6)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$

Obecně může nastat několik kombinací amplitudy a fáze - tzv. *Stavy polarizace* – *States of Polarization* (SOP). Na následujícím obrázku 1.4 je znázorněných 6 stavů. Lineární horizontálně a vertikálně polarizované světlo - LHP a LVP popisují první dva obrázky. Další dva jsou pootočené o $+45^\circ$ resp -45° -tzv. L+45P a L-45P. Lineární horizontálně polarizované světlo může být ještě pravotočivé nebo levotočivé jak ukazují poslední dva obrázky - RHP a LHP.

K vyjádření polarizační elipsy můžeme využít dva parametry - orientační úhel ψ ($0 \leq \psi \leq \pi$) a eliptický úhel χ ($\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4$) [1][5]:

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta, \quad (1.7)$$

$$\sin 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \sin \delta, \quad (1.8)$$

Když využijeme pomocný úhel α definovaný jako:

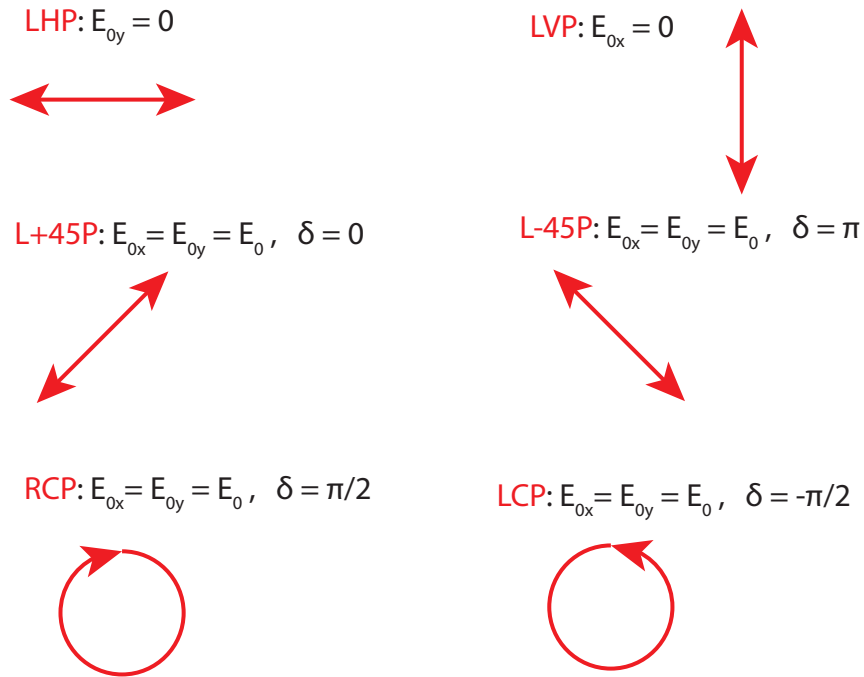
$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}, \quad (1.9)$$

kde $0 \leq \alpha \leq \pi/2$, získáme dvě čistě trigonometrické rovnice:

$$\tan 2\psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta, \quad (1.10)$$

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta, \quad (1.11)$$

Rovnice platí pro $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ a $0 \leq \delta \leq 2\pi$.



Obr. 1.4: Stavy polarizace v různých kombinacích amplitudy a fáze [5].

1.2 Kruhová polarizace

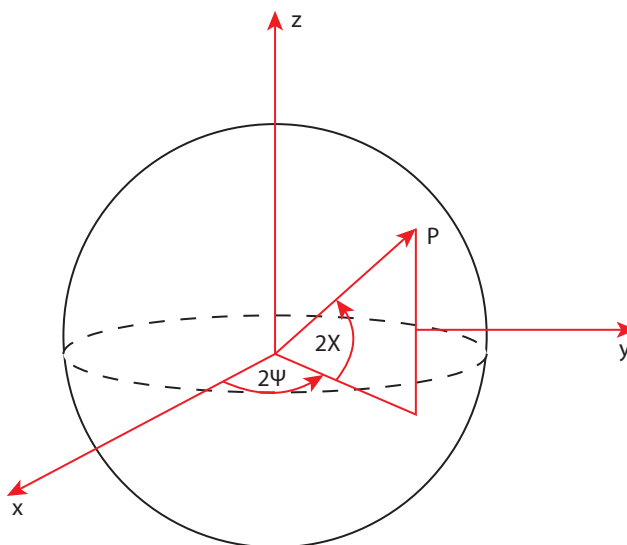
Eliptická polarizace, která má obě složky elektrické intenzity vzájemně posunuty o $\pi/2$ a zároveň amplitudy jsou si rovny $E_{0x} = E_{0y} = E_0$. Tato polarizace se potom nazývá kruhová, kde rozlišujeme dva druhy, levotočivou, která je definována posuvem $\delta = -\pi/2$ a pravotočivou s posuvem $\delta = \pi/2$. Koncový bod vektoru elektrické intenzity opisuje kružnici.[6]

1.3 Lineární polarizace

Případem, kdy koncový bod vektoru \mathbf{E} znázorní úsečku, je lineární polarizace. Ta nastává pokud je jedna ze složek elektrické E_{0y} , E_0 intenzity nulová, nebo je fázový rozdíl roven nule, případně když jsou složky v protifázi.[6]

1.4 Poincarého koule

Pro vyjádření parametrů polarizace se často využívá polarizační elipsa. V některých případech, zejména když se světelný paprsek šíří přes několik polarizačních prvků, je lepší využít zobrazení navržené francouzským matematikem a fyzikem *Poincarém*, které dnes nazýváme Poincarého koule. Na obr. 1.5 je zobrazena Poincarého koule v kartézském souřadnicovém systému.



Obr. 1.5: Poincarého koule v kartézském souřadnicovém systému[1].

Osy v kartézském systému jsou označeny x , y a z , 2ψ a 2χ vyjadřují koordinační pár. Pro jednotkovou kružnici v kartézské soustavě můžeme napsat[5]:

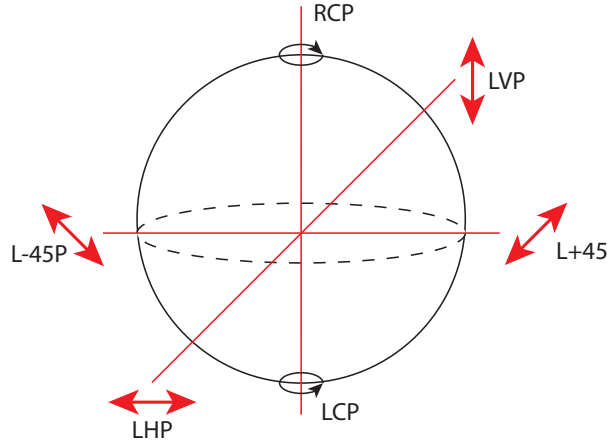
$$x = \cos(2\chi) \cos(2\psi), \quad 0 \leq \psi \leq \pi, \quad (1.12)$$

$$y = \cos(2\chi) \sin(2\psi), \quad -\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4, \quad (1.13)$$

$$z = \sin(2\chi), \quad (1.14)$$

kde platí $x^2 + y^2 + z^2 = 1$. Pomocí předchozích rovnic můžeme vyjádřit jakýkoliv polarizační stav koordinačním párem $2\psi, 2\chi$. Na obr.1.6 jsou znázorněny tyto polarizační stavy: LHP($0^\circ, 0^\circ$), L+45P($90^\circ, 0^\circ$), LHP($180^\circ, 0^\circ$), L-45P($270^\circ, 0^\circ$), LHP($0^\circ, 90^\circ$), LHP($0^\circ, -90^\circ$).

Všechny stavy lineární polarizace leží na rovníku Poincarého koule ($\chi=0$), severní a jižní pól reprezentuje kruhovou pravotočivou resp. levotočivou polarizaci. Všechny



Obr. 1.6: Polarizační stavy[5].

stavy eliptické polarizace jsou reprezentovány na všech ostatních místech povrchu koule[5].

1.5 Stokesovy polarizační parametry

Polarizační elipsa a Poincarého koule neumožňuje přímo změřit χ ani ψ . Navíc se pomocí polarizační elipsy nedá reprezentovat stav polarizace v reálném čase. K překonání tohoto problému slouží tzv. Stokesovy polarizační parametry, které získáme využitím časového průměru z rovnice 1.4. Výsledkem je následovná rovnice:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (1.15)$$

kde

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (1.16)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (1.17)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta, \quad (1.18)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta, \quad \delta = \delta_y - \delta_x. \quad (1.19)$$

Tyto čtyři parametry byly definovány irským matematikem *Stokesem*. Parametr S_0 definuje celkovou intenzitu světla, S_1 popisuje převahu LHP světla vůči LHP. Třetí parametr S_2 popisuje převahu L+45P světla nad L-45P a S_3 dominanci LHP světla nad LHP. Často se parametry zapisují v maticovém tvaru, čímž vytvoří tzv Stokesův

vektor pro polarizované světlo[5][1]:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

Pro různé stavy polarizace potom Stokesovy vektory jsou rovny:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{LHP} &= I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_{LVP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_{L+45P} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \mathbf{S}_{L-45P} &= I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_{RCP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_{LCP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \text{ kde } I_0 \text{ je intenzita světla.} \end{aligned}$$

Stokesovy parametry můžeme vyjádřit také pomocí úhlů χ a ψ [5][1]:

$$S_1 = S_0 \cos(2\chi) \cos(2\psi), \quad (1.21)$$

$$S_2 = S_0 \cos(2\chi) \sin(2\psi), \quad (1.22)$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi), \quad (1.23)$$

kde potom:

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right), \quad 0 \leq \psi \leq \pi, \quad (1.24)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{S_3}{S_0} \right), \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4}. \quad (1.25)$$

Pomocí Stokesových parametrů můžeme vyjádřit i částečně polarizované světlo, nebo nepolarizované světlo. Vektor pro nepolarizované světlo má tvar:

$$\mathbf{S}_{nepolarizované} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.26)$$

, kde S_0 je celková intenzita. Parametry S_1, S_2, S_3 jsou rovny nule. Částečně polarizované světlo vyjádříme jako kompletně polarizované světlo v kombinaci s nepolarizovaným:

$$\mathbf{S} = S_0 \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (1 - \rho) \begin{pmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \rho \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (1.27)$$

, kde ρ je *Stupeň polarizace – Degree of Polarization* (DOP). Ten je pro kompletně polarizované světlo roven 1 a pro úplně nepolarizované roven nule. DOP je potom definován jako:

$$\rho = \frac{I_{pol}}{I_{celk}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad (1.28)$$

kde I_{celk} je celková intenzita světla a zároveň musíme rozšířit původní rovnici na[5][1]:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (1.29)$$

1.5.1 Muellerovy matice

Změnit polarizační stav můžeme například změnou amplitudy, fáze nebo rotací elipsy. K tomu slouží polarizační prvky z různých materiálů. Matematicky můžeme reprezentovat výsledný světelný paprsek Stokesovými vektory vynásobenými tzv. Muellerovou maticí[5][1]:

$$\begin{pmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1.30)$$

Obecně můžeme taky napsat:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}, \quad (1.31)$$

kde \mathbf{S}' reprezentuje výsledný paprsek, \mathbf{S} původní paprsek a \mathbf{M} Muellerovou matici o rozměru 4×4 . Muellerova matice se liší pro různé materiály. Pro vlnové destičky s fázovým posuvem ϕ je to obecně:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1.32)$$

V případě čtvrtvlnné destičky ($\phi = \frac{\pi}{2}$) se potom Muellerova matice rovná[5][1]:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.33)$$

Muellerova matice pro lineární polarizátor v obecném tvaru[5][1]:

$$\mathbf{M}_{POL}(p_x, p_y) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} p_x^2 + p_y^2 & p_x^2 - p_y^2 & 0 & 0 \\ p_x^2 - p_y^2 & p_x^2 + p_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2p_x + p_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2p_x + p_y \end{pmatrix}, \quad (1.34)$$

kde p_x a p_y jsou tzv. absorpční koeficienty. Hodnota 0 reprezentuje úplnou absorpci (žádný přenos) a 1 úplný přenos (žádná absorpce).

Ideální polarizátor s přenosem podél osy x resp. s přenosem podél osy y je vyjádřen následujícími maticemi:

$$\mathbf{M}_{POL}(p_x = 1, p_y = 0) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1.35)$$

$$\mathbf{M}_{POL}(p_x = 0, p_y = 1) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.36)$$

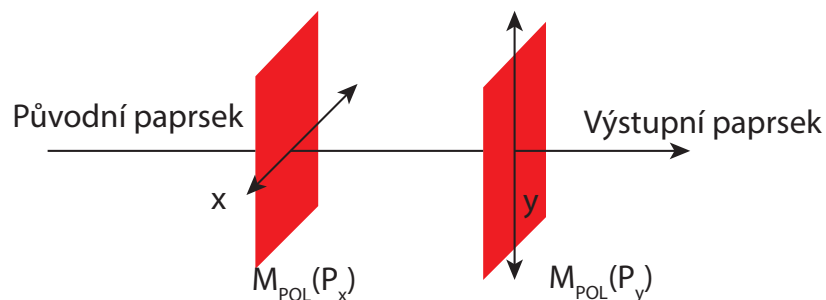
Pokud využijeme polarizátory oba (viz obr.1.7), výsledná matice pro tento pár je nulová matice, žádné světlo nepropustí:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{POL}(p_x) \cdot \mathbf{M}_{POL}(p_y) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.37)$$

Jiným způsobem jak změnit SOP světla je použití tzv. rotátoru. Obecná Muellerova matice rotátoru je[1]:

$$\mathbf{M}_{ROT}(\phi) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ 0 & -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.38)$$

, kde ϕ je úhel natočení elipsy.



Obr. 1.7: Křížené polarizátory[1].

1.5.2 Jonesův maticový počet

V roce 1941 zavedl americký fyzik *Jones* tzv. Jonesův maticový počet, kterým popsal úplně polarizované světlo. Součástí popisu je Jonesův vektor o velikosti 2×1 , který definuje polarizované světlo a Jonesovy matice o rozměru 2×2 popisující polarizující prvky. Nevýhodou je, že Jonesův počet nemůžeme použít v případě částečně, nebo vůbec nepolarizovaného světla[1].

Jonesův vektor můžeme zapsat jako matici[7]:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |E_{0x}| e^{i\delta_x} \\ |E_{0y}| e^{i\delta_y} \end{pmatrix}, \quad (1.39)$$

kde E_{0x} a E_{0y} jsou amplitudy elektrické intenzity, δ_x a δ_y jsou fáze a $i = \sqrt{-1}$.

Pomocí maticové transpozice vyjádříme intenzitu jako:

$$I = \mathbf{E}^\dagger \cdot \mathbf{E} \quad (1.40)$$

V rozvinutém tvaru[1]:

$$I = (E_x^* E_y^*) \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = E_x E_x^* + E_y E_y^* \quad (1.41)$$

Jonesovy vektory pro některé SOP:

$$\mathbf{E}_{LHP} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_{LVP} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_{L+45P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.42)$$

$$\mathbf{E}_{L+45P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_{RCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (1.43)$$

Následující příklady matic jsou převzaté z [1] a [5]:

Jonesova matice pro polarizační prvek má rozměr 2×2 :

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{pmatrix} \quad (1.44)$$

Lineární polarizátor je obecně definován jako:

$$\mathbf{J}_{POL} = \begin{pmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{pmatrix}, \quad 0 \leq p_x, p_y \leq 1 \quad (1.45)$$

Konkrétně pro lineární horizontální resp. vertikální polarizaci je to:

$$\mathbf{J}_{LHP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}_{LVP} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.46)$$

Jonesova matice pro polarizační destičku s fázovým posuvem $\phi/2$ podél osy x a $\phi/2$ podél y je:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} e^{i(\phi/2)} & 0 \\ 0 & e^{-i(\phi/2)} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\phi} \end{pmatrix} \quad (1.47)$$

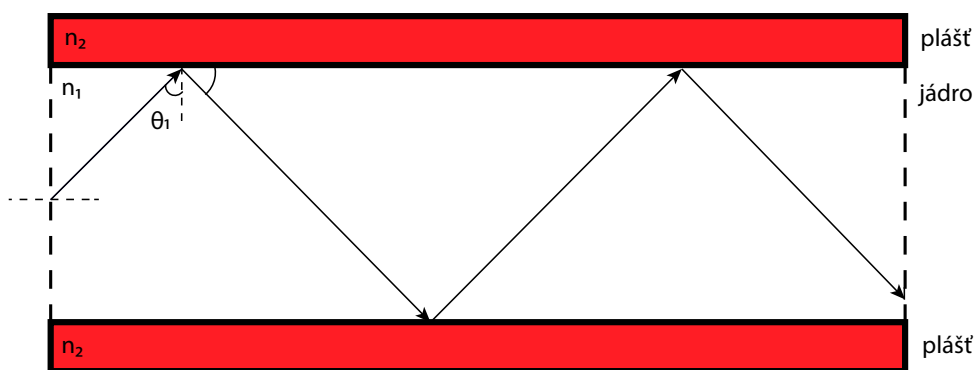
Posledním příkladem Jonesova vektoru, který definujeme, je vektor pro rotátor:

$$\mathbf{J}_{ROT}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.48)$$

2 Optický přenos

Z důvodu narůstající poptávky po rychlých datových přenosech v komunikačních sítích bylo od poloviny minulého století provedeno mnoho experimentů, které vyvrcholili do sestrojení prvního optického přenosového systému německým fyzikem *Börnerem* v roce 1965. Ten byl založen na přeměně elektrického signálu na světelný použitím laserové diody, následným nasměrováním do optického vlákna a zachycením signálu fotodiodou na druhé straně přenosového systému.

Fyzikální podstatou přenosu optického signálu ve vláknu je úplný odraz světla. Ten nastává při dopadu světelného paprsku, který se šíří v optickém prostředí s indexem lomu n_1 (jádro) na rozhraní s optickým prostředím s indexem lomu n_2 (plášť). Úhel dopadu musí splňovat podmínku 1.3 viz obr. 2.1 . Jelikož je cílem pokud možno co nejvíc omezit různé nežádoucí fyzikální jevy, které při šíření nastávají, využívá se hlavně světlo o vlnové délce 1260 nm a 1675 nm[8].



Obr. 2.1: Úplný odraz ve vláknu[8].

2.1 Optická vlákna, jevy ve vláknu

Optické vlákno se konstrukčně skládá ze dvou částí, jádra válcového tvaru a pláště (obalu). Průměr jádra a pláště je řádově v mikrometrech. Podél osy jádra se šíří světelný paprsek, který když narazí na rozhraní pláště s menším indexem lomu, tak nastává v ideálním případě úplný odraz. Ve skutečnosti na optický přenos ovlivňuje více fyzikálních jevů. Při konstrukci optických vláken sloužících na přenos signálu na velké vzdálenosti se používá hlavně sklo složené z oxidu křemičitého – SiO_2 [9]. Pro přenos na menší vzdálenosti (většinou ke koncovému uživateli, řádově stovky metrů) plastové vlákno nebo vlákno kombinující plastové jádro a skleněný plášť. Tyto materiály mají horší fyzikální vlastnosti než celoskleněná vlákna, a proto se kvůli ceně využívají pouze na kratší vzdálenosti.

Základní rozdělení optických vláken spočívá v počtu vidů, které vlákno přenáší. Na

krátké vzdálenosti se nejčastěji používá tzv. mnohavidové vlákno, které přenáší více vidů – paprsků světla se stejnou vlnovou délkou. Na větší vzdálenosti – typicky mezi městy, státy nebo kontinenty se využívá vlákno jednovidové, které přenáší jenom jeden paprsek světla.[8]

2.1.1 Mnohavidová vlákna

Mnohavidová vlákna přenáší na rozdíl od jednovidového vlákna víc než jeden světelný paprsek. Průměr jádra je mnohem větší, typicky se používá 50 až 62,5 μm . To právě umožňuje použití jednodušších a levnějších zdrojů signálu – *Light Emitting Diode* (LED) nebo *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser* (VCSEL). Velikost jádra ale způsobuje také větší disperzi, z toho vyplývající ztrátu signálu, proto se využívají při komunikaci na menší vzdálenosti – přibližně do vzdálenosti 2 km dokážou zajistit přenosovou kapacitu až 100 Mbit/s, do vzdálenosti přibližně 150 m teoreticky až 100 Gbit/s[8][11][12][10].

Mnohavidová vlákna se skokovým indexem lomu

V případě mnohavidových vláken se skokovým indexem lomu se jednotlivé paprsky šíří úplným odrazem. Významnou charakteristickou vlastností těchto vláken je vysoká vidová disperze.[8]

Mnohavidová gradientní vlákna

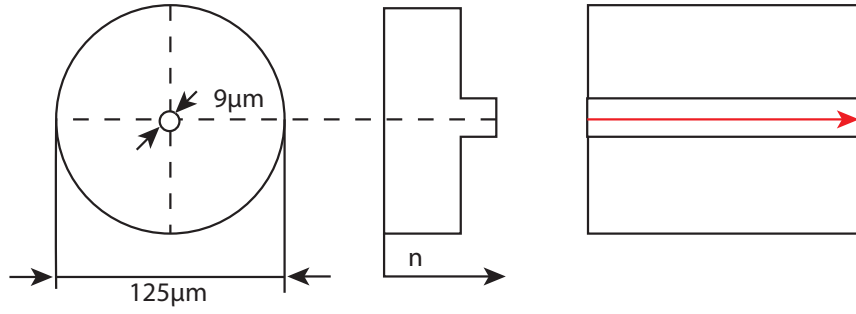
Gradientní vlákna se vyznačují zmenšujícím se indexem lomu se vzdáleností od středu vlákna. Větší index lomu ve středu jádra zpomaluje některé světelné paprsky, čímž umožňuje aby všechny paprsky dosáhli cíle v přibližně stejném čase a tím redukuje jev disperze.[8]

2.1.2 Jednovidová vlákna

Jak vyplývá z předchozího popisu, jednovidová vlákna vedou jenom jeden světelný paprsek jádrem o průměru 8 až 10 μm viz obr. 2.2. Jako zdroj signálu se využívají laserové diody a celkově je toto řešení dražší. Díky vysokým přenosovým rychlostem, v současnosti možných až 26 Tbit/s (do vzdálenosti řádově desítek kilometrů) tvoří páteřní síť.[8][13]

2.1.3 Dvojlom ve vláknu

Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, světlo se šíří ve formě dvou ortogonálních složek elektrického vektoru lišících se amplitudou a fází. V ideálním vláknu by se



Obr. 2.2: Jednovidové vlákno[10].

indexy lomu obou rovin rovnali ($n_x = n_y$), vlnové čísla β_x a β_y by byli stejné a rychlost šíření v_f podél obou os by se rovnala. Ve skutečnosti jsou ale z důvodu materiálových vlastností tyto indexy vždy odlišné, stejně jako fázové rychlosti šíření $v_{f,x} \neq v_{f,y}$ a nastává proto tzv. dvojlom.[15] Definujeme jej jako rozdíl konstant šíření v obou rovinách:

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| = \frac{2\pi}{\lambda} |n_x - n_y| = \frac{\omega}{c} \Delta n, \quad (2.1)$$

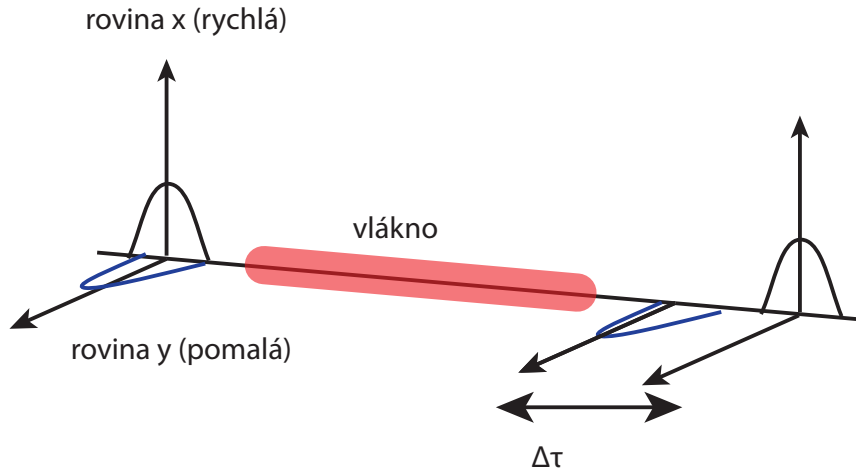
kde c je rychlost světla ve vakuu a Δn rozdíl indexu lomu - stupeň dvojlomu[14].

V případě neideálního vlákna přiřadíme β_x pomalé rovině a β_y rychlé rovině viz obr.2.3.

Fázový posuv definujeme:

$$\Delta\phi = |\beta_x - \beta_y| l_v, \quad (2.2)$$

kde l_v je délka vlákna[15].



Obr. 2.3: Časový rozdíl šíření světla[14].

Derivací předchozí rovnice podle ω můžeme vyjádřit vztah pro $\Delta\tau$ [14]:

$$\Delta\tau = \frac{d\Delta\beta}{d\omega} l_v = \left(\frac{\Delta n}{c} + \frac{\omega d\Delta n}{cd\omega} \right) l_v \quad (2.3)$$

Dvojlom rozdělujeme na *lineární* a *kruhový* podle toho, jaký vliv má na polarizační stav vlny. *Lineární* dvojlom vzniká pokud anizotropní prostředí dvou ortogonálních os x a y má odlišné indexy lomu. Tím způsobí změnu polarizace lineární na eliptickou(kruhovou). Fázové rychlosti vidů $v_{f,x}$ a $v_{f,y}$ v souvislosti s velikostí složek vlnových čísel β_x a β_y můžeme definovat[24]:

$$v_{f,x} = \frac{2\pi f}{\beta_x}, \quad v_{f,y} = \frac{2\pi f}{\beta_y} \quad (2.4)$$

V případě dvojlomu *kruhového* definujeme pojem chirálně dvojlomného prostředí. To je charakteristické rozdílnými indexy lomu pro pravotočivě a levotočivě kruhově polarizovanou vlnu. Když superpozicí pravotočivě a levotočivě kruhově polarizovaných vln nazveme lineární polarizovanou vlnu, můžeme definovat fázový posuv $\Delta\phi$ vztahem[24]:

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda}(n^p - n^l)l = \sigma l, \quad (2.5)$$

kde λ je vlnová délka výsledné vlny, l je délka dráhy, kterou vlna prochází kruhově dvojlomným prostředím a σ je měrná stáčivost prostředí.

Navíc můžeme rozdělít dvojlom obecně na *latentní* a *indukovaný*. *Latentní* dvojlom vzniká při výrobě vlákna, průřez není dokonale kruhový podél celé délky vlákna. Taký může nerovnoměrným chlazením materiálu vzniknout lokální mechanické napětí na různých místech. Odlišný index lomu a tím pádem odlišná rychlost šíření vidů je zas způsobená vnitřním anizotropním mechanickým napětím ve vláknu. *Indukovaný* dvojlom na druhé straně vzniká působením vnějších vlivů, které mohou být mechanické nebo teplotní. Ohyb při instalaci vlákna potom způsobí rozdílné mechanické napětí v místech ohybu a tak vzniknou roviny s odlišným indexem lomu oproti místu bez ohybu[24]. Obvykle oba jevy považujeme za nežádoucí, v některých aplikacích je možné je využít, například pro zaznamenávání působení různých fyzikálních veličin na vlákno. Výskyt kruhového dvojlomu latentního charakteru je v jednovidových vláknech spíš zanedbatelný.

V jednovidových vláknech může dojít k současnému působení jak lineárních a kruhových, tak i latentních a indukovaných dvojlomů. Celkový fázový posuv ortogonálních vidů potom definujeme jako geometrický průměr hodnot lineárního a kruhového dvojlomu[24]:

$$\Delta\phi = \sqrt{\phi_k^2 + \left(\frac{\phi_1}{2}\right)^2}, \quad (2.6)$$

kde ϕ_k je fázový posuv vidů způsobený kruhovým dvojlomem a ϕ_1 fázový posuv způsobený lineárním dvojlomem. Pro zjednodušení popisu tohoto prostředí můžeme využít zápis s využitím Jonesovy matice[24]:

$$\mathbf{T}_{ov} = \begin{pmatrix} \cos \Delta\phi + j \frac{\phi_1}{2} \frac{\sin \Delta\phi}{\sin} & -\phi_k \frac{\sin \Delta\phi}{\Delta\phi} \\ \phi_k \frac{\sin \Delta\phi}{\Delta\phi} & \cos \Delta\phi - j \frac{\phi_1}{2} \frac{\sin \Delta\phi}{\sin} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Dvojlom taky mění SOP světla šířícího se ve vláknu. Pokud bychom ve vláknu měli světlo s lineární polarizací, můžeme jej rozdělit na dvě složky - jedna šířící se v pomalé rovině (podél osy x) a druhá v rychlé rovině (osa y). Rozdíl fáze těchto dvou složek nám potom určí výsledný stav polarizace. U světelných paprsků se stejnou frekvencí definujeme fázový rozdíl jako[16]:

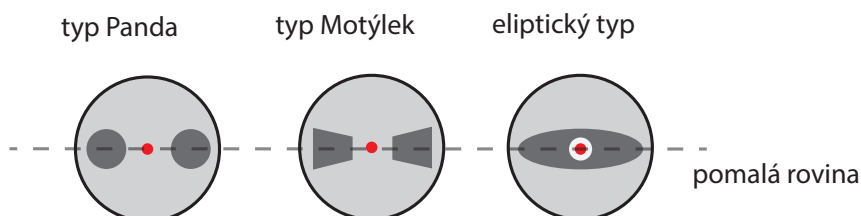
$$\Delta\phi = \Delta\beta l_v \quad (2.8)$$

Délku, po které bude SOP stejný jak na začátku vlákna označujeme l_b - záznejová délka(Beat length). Z předchozího vztahu odvodíme[16]:

$$l_b = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{\Delta n} \quad (2.9)$$

2.1.4 Polarizaci zachovávající vlákna

Polarizaci zachovávající vlákna – *Polarization Maintaining Fiber* (PMF) jsou speciálním typem jednovidového vlákna, které má vnitřní strukturu navrženu tak, aby byla polarizace zachována na velkých délkách tím, že záměrně udržuje dvojlom ve vláknu. Tyto vlastnosti získá vlákno při výrobě s využitím mechanického tlaku, při zpracování tahových tyčinek. Obecně můžeme PMF vlákna rozdělit na vlákna zachovávající lineární polarizaci (LMPF) a vlákna zachovávající kruhovou polarizaci(CPMF).



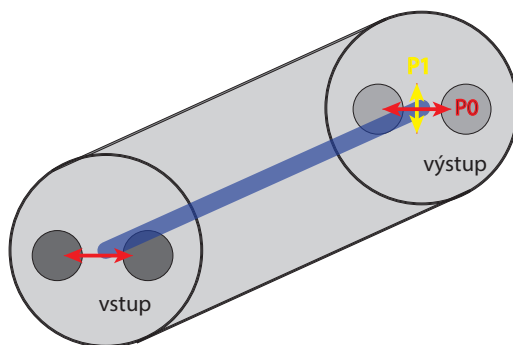
Obr. 2.4: Tři typy PMF vláken [17].

Obrázek 2.4 ukazuje tři typy PMF vláken, které kromě jádra uprostřed mají tzv. tahové tyčinky. U vlákna typu Panda mají kruhový tvar, u typu motýlek připomínají motýlí křídla. Elipsa situovaná kolem jádra je základem třetího typu eliptického PMF vlákna. Podle názvu je zřejmé, že tahové tyčinky vytváří na jádro vlákna tlak, takže upřednostňuje přenos v požadované polarizační rovině. V praxi, zejména při rozdělení vlákna je důležité seřízení nejenom ve všech třech osách, ale i rotace, která zajistí přesné napojení tahových tyčinek. PMF vlákna se často využívají v optických koherentních systémech, $LiNbO_3$ modulátorech, Ramanových zesilovačích a ve všech případech, kde je nutné zachování polarizačních rovin[17].

Jednou z důležitých charakteristik polarizaci zachovávajících vláken je tzv. polarizační přeslech. Definujeme jej[18]:

$$přeslech(dB) = \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right), \quad (2.10)$$

kde P_0 je výkon v hlavní polarizační rovině na výstupu a P_1 je nechtěná polarizace viz obr.2.5



Obr. 2.5: Polarizační přeslech [18].

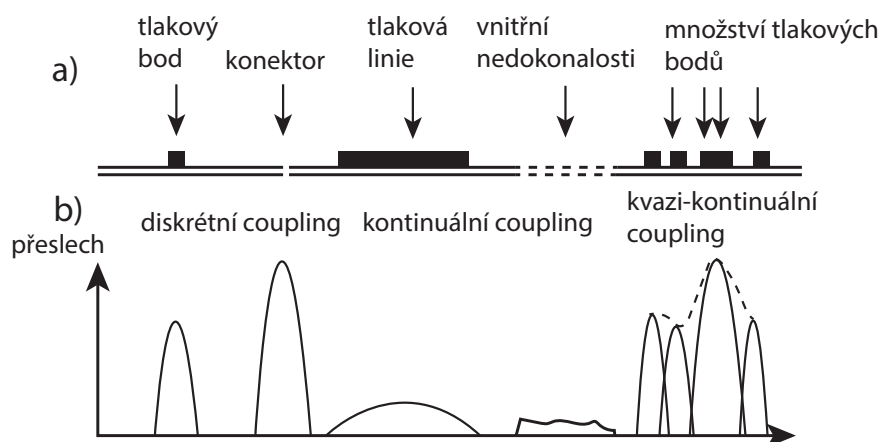
Polarizační přeslech vzniká zejména z 3 příčin. První příčinou je špatné vzájemné zarovnání os vlákna na rozhraních jako jsou konektory a různé spoje, které zapříčiňuje přesně lokalizované přeslechy s velkou amplitudou. Její velikost závisí na úhlu vzájemného zarovnání os. Druhou příčinu tvoří nedokonalosti vlákna jako například lokální rozdíly v dvojlomu, tvarové nedokonalosti nebo vnitřní tlak, který způsobuje vzájemné ovlivňování vidů po celé délce vlákna. Poslední příčinou vzniku polarizačního přeslechu je vnější mechanický vliv působící na různé části vlákna, jako například ohýbání vlákna, tlak na určité místa atd. To může způsobovat různé komplikované přeslechové jevy, buď bodově s velkou amplitudou nebo rozprostřeně podél celé, nebo části délky vlákna[25].

Obrázek 2.6 a) zobrazuje různé zdroje přeslechu podél vlákna, 2.6 b) zobrazuje grafickou reprezentaci výsledku měření v závislosti na zdrojích z a).

Standardním požadavkem na velikost polarizačního přeslechu je hodnota -25dB na 100 metrů délky vlákna nebo menší[26].

2.2 Slučování kanálů v optických sítích

V optických sítích se často využívá tzv. multiplexování, nebo-li slučování kanálů, tedy proces, při kterém se analogové signály nebo digitální datové toky slučují do jednoho signálu. Je to zejména kvůli efektivnímu využití přenosového média a tím pádem nižším nákladům. Zařízení, které provádí multiplexování se nazývá multiplexor.



Obr. 2.6: Zdroje polarizačního přeslechu[25].

Opačným procesem, tedy převodem sloučeného signálu zpátky na jednotlivé složky – demultiplexováním se zabývá demultiplexer. Následující text o časovém a vlnovém multiplexu je s úpravami převzat z mé bakalářské práce[8].

2.2.1 Časový multiplex

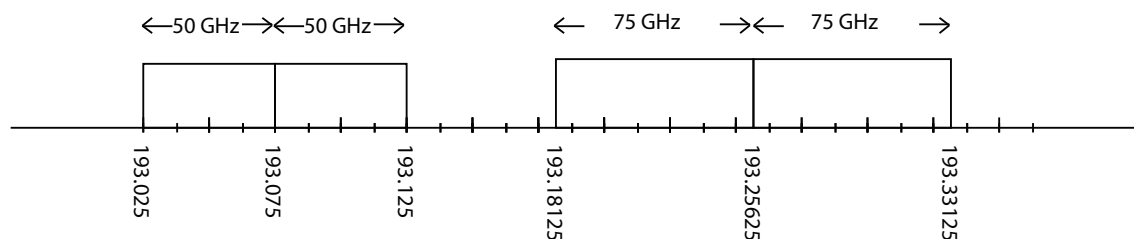
TDM (Time Division Multiplex) je jedním ze základních druhů multiplexu. Funguje na principu, že každý jednotlivý signál je vyslán pouze v určitém časovém úseku tzv. časovém slotu. Časové sloty mají svou definovanou délku a seskupují se do tzv. rámců (frames), které tvoří celkovou rámcovou strukturu. Problém jak rozlišit sloty konkrétních signálů od sebe řeší přidání tzv. synchronizačního slotu, který se nachází na začátku rámce a má přesně definovanou strukturu.

2.2.2 Vlnový multiplex

WDM (Wavelength Division Multiplex) nebo vlnový multiplex je v optických sítích označení pro multiplexování na základě rozdílné vlnové délky světelných zdrojů. Při přenosu po metalickém vedení se používá označení FDM (Frequency Division Multiplex), protože za charakteristickou vlastnost signálu se považuje frekvence. Základem WDM systému multiplexer a demultiplexer, který rozděljuje resp. spájí signál.

Hrubý vlnový multiplex

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) vyjadřuje skutečnost, že vlnové délky signálu použitých pro přenos mají mezi sebou „velkou“ rozteč, ještě před standardizací ITU (International Telecommunication Union) se využívali dvě pásma –



Obr. 2.7: Vlnové délky CWDM [20].

1310 nm a 1550 nm. V roce 2003 byla standardizována kanálová rozteč 20 nm při rozsahu vlnových délek 1270 nm až 1610 nm. Prakticky se využívá pásmo ale až od 1470 nm, protože pod ním je zvýšený útlum. Takto široká kanálová rozteč má výhodu, že je možné použití teplotně nestabilizovaných laserů. V tabulce 2.1 jsou znázorněné jednotlivé vlnové délky CWDM multiplexu podle standardů ITU [19].

Tab. 2.1: Nominální vlnové délky při 20 nm kanálové rozteči.

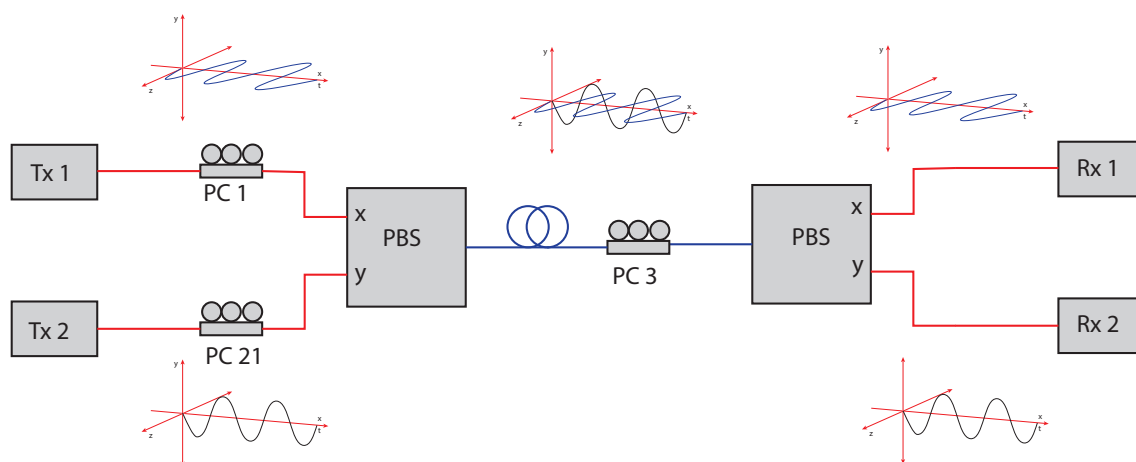
1270 nm	1390 nm	1510 nm
1290 nm	1410 nm	1530 nm
1310 nm	1430 nm	1550 nm
1330 nm	1450 nm	1570 nm
1350 nm	1470 nm	1590 nm
1370 nm	1490 nm	1610 nm

DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) technologie je „dokonalejší“ verzí CWDM, umožňuje pouze 0,8 nm odstup jednotlivých kanálů od sebe. Díky tomu je možné v jednom optickém vláknu přenášet až desítky kanálů. Využívají se jedno-vidové lasery s úzkou spektrální čarou a úzkopásmové interferenční filtry. Standard ITU-T 694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“ definuje přenosové kanály pro odstupy jednotlivých kanálů 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz a 12,5 GHz. Tyhle rozestupy jsou konstantní v celém rozsahu – tzv. fixed grid. V poslední době se ale už ve větším rozsahu využívají tzv. flexible grids. Jedním z důvodů proč se rozšiřují je větší možnost optimalizace a využití přenosové šířky. Jako příklad může sloužit využití dvou 50 GHz a dvou 75 GHz slotů jako na obr.2.7.[20].

2.2.3 Polarizační multiplex

Polarizační multiplex nebo-li duální polarizace umožňuje v optických systémech zdvojnásobit spektrální efektivitu přenosu tím, že využívá pro přenos informací nezávisle obě polarizační roviny. Jde o poměrně jednoduchou možnost zvýšení kapacity bez velkých zásahů do existující infrastruktury. Založen je na navázání nezávislého optického signálu do dvou polarizačních rovin za pomoci tzv. *Polarizační dělič* – *Polarization Beam Splitter* (PBS). Signál je vyslán ve dvou ortogonálně polarizovaných rovinách, přičemž pro detekci výsledného signálu je nutné, aby byla ortogonalita na výstupu zachována. Kruhová asymetrie ve vláknu a dvojlom způsobují, že se ale ortogonalita porušuje[21]. Na obrázku 2.8 je zobrazena základní schéma polarizačního multiplexu. Podle obrázku vidíme, že polarizační multiplex má dva vstupy s pola-



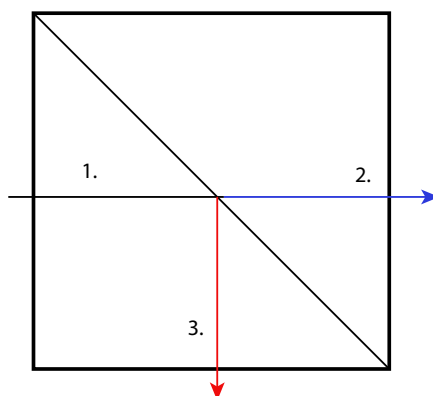
Obr. 2.8: Základní schéma polarizačního multiplexu[22].

rizačními filtry (horizontální a vertikální polarizace), přes které je signál navázán do rovin x a y . Pomocí tzv. *Polarizační kontrolér* – *Polarization Controller* (PC) dosáhneme rovnoběžnosti osy polarizace každého signálu s osou portu. Následuje polarizační dělič, kterým se navážou oba signály do jednoho společného vlákna. Na konci optické trasy je další polarizační kontrolér, jej funkce je optimálně natočit multiplexovaný signál, přičemž obě polarizační roviny jsou rovnoběžné s rovinami dalšího polarizačního děliče zapojeného ve funkci demultiplexeru[21]. V následujících dvou podkapitolách jsou blíže popsány funkce polarizačního děliče a kontroléru, které jsou částečně převzaty z méj bakalářské práce[8] a částečně z [21][22].

Polarizační dělič

Polarizační dělič může plnit 2 různé funkce, podle toho jestli signály rozděluje do dvou polarizačních rovin, nebo je naopak ze dvou polarizačních rovin spojuje do jedné. Obecně je tvořen dvěma stmelenými trojbokými hranoly, díky vrstvě mezi

hranoly se signál dělí na dva v rovinách na sebe kolmých viz obr. 2.9. PBS můžeme



Obr. 2.9: Polarizační dělič[8].

popsat využitím kartézských souřadnic, kdy koeficienty odrazu a přenosu R_x , T_x a R_y , T_y paprsku šířícího se podél osy x splňuje[22]:

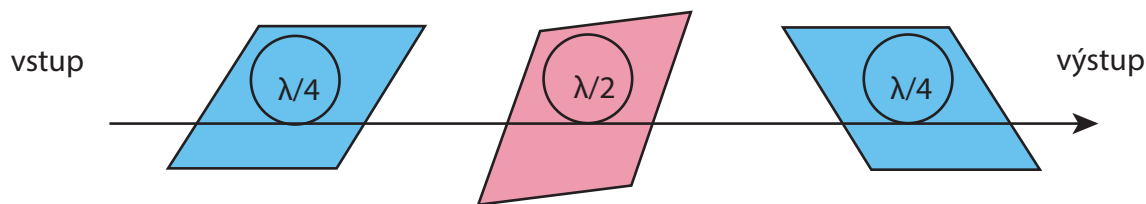
$$R_x + T_x = R_y + T_y = 1 \quad (2.11)$$

Polarizační kontrolér

PC je zařízení sloužící k ovládání stavu polarizace světla uvnitř vlákna. To se může docílit mechanickou deformací, která způsobí odlišné indexy lomu pro jednotlivé polarizační stavy nebo mechanickým tlakem na vlákno kolmo na jeho osu. Základem PC jsou tři fázové destičky. První promění vstupní signál na lineárně polarizovaný, druhá natočí signál do úhlu, který požadujeme a poslední zaručí správný stav polarizace. V praxi se jedná o navinuté vlákno do cívky, čímž v destičce vznikne napětí vyvolávající dvojlom. Na obr.2.10 je schematicky zobrazen polarizační kontrolér[21][8].

2.3 Modulace v optických sítích

V optických sítích se tzv. modulací – nelineárním procesem ovlivňuje nosný signál. Signál, který jej ovlivňuje, se nazývá modulační signál. Modulována může být fáze, frekvence nebo amplituda signálu. Jednotlivé typy modulací můžeme obecně rozdělit podle typu nosného signálu na analogové, digitální a diskrétní modulace. V této práci se budeme věnovat jenom nejčastěji používaným typům modulace založeném na klíčování fázovým posuvem a kvadraturní amplitudové modulaci resp. kombinacím, které využívají polarizační multiplex. Text je částečně převzatý a upravený z méjí bakalářské práce[8] a dalších zdrojů.



Obr. 2.10: Polarizační kontrolér[22].

2.3.1 Klíčování fázovým posuvem

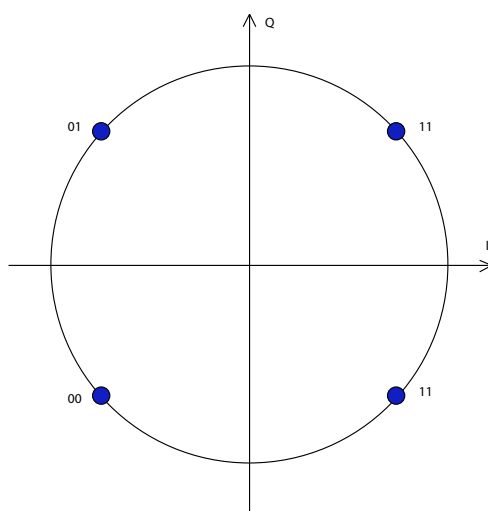
Klíčování fázovým posuvem – Phase-Shift Keying (PSK) je typ modulace, při kterém dochází ke změně fáze nosného signálu o určitou hodnotu.

Kvadrurní klíčování fázovým posuvem

Příkladem je *Kvadrurní klíčování fázovým posuvem – Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK)* modulace. Ta využívá posuv fáze nosného signálu vždy o 90° a umožňuje kódovat až 2 bity na symbol, tím pádem zvyšuje datovou rychlost. Matematicky můžeme QPSK modulaci popsat následovně[8]:

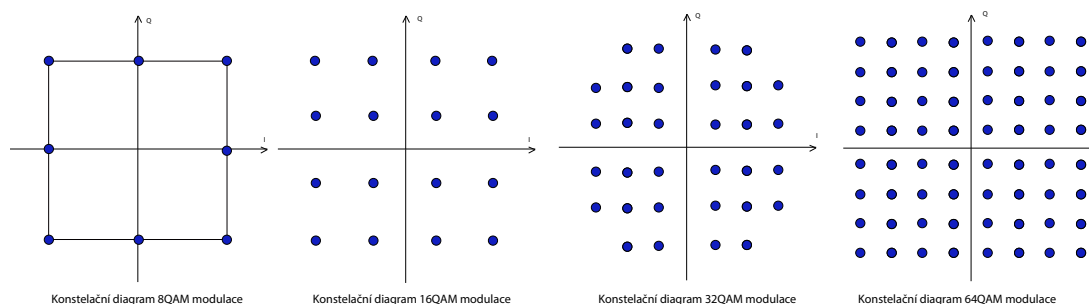
$$S_n(t) = \sqrt{2E_b/T_b} \cos(2\pi f_c t + (2n - 1)\frac{\pi}{4}) \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (2.12)$$

Konstelační diagram, kterým v komplexní rovině zobrazuje body reprezentující jednotlivé fáze můžeme vidět na obr.2.11. Modifikací QPSK modulační techniky je



Obr. 2.11: Konstelační diagram pro QPSK modulaci[8].

možné dosáhnout další, efektivnější modulační techniky jako například DQPSK. V



Obr. 2.12: Konstelační diagram pro mQAM modulace[8].

případě QPSK modulace může existovat určitá nejednoznačnost fáze. Tento problém řeší tzv. diferenciální kódování, kdy jednotlivé symboly/data nejsou reprezentovány fází, ale samy způsobují tuto změnu fáze[8].

Diferenciální kvadrurní klíčování fázovým posuvem

DQPSK kódování zařazujeme právě mezi diferenciální - spoléhá na rozdíl mezi aktuální a předchozí fází a ne na absolutní pozici fáze. Změnou fáze se mění i informace symbolů. Úlohou demodulátoru je sledovat změny fáze na základě[8].

2.3.2 Kvadrurní amplitudová modulace

Kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation (QAM) je často využívanou modulací jak v analogovém přenosu, tak i v digitálním. Využívá dva signály, obvykle sinusového průběhu, které jsou vzájemně posunuty o 90° - tzv. kvadrurní komponenty. Poté jsou signály amplitudově klíčovány a sečteny. Na výsledný signál můžeme taky nahlížet jako na kombinaci amplitudové a fázové modulace. Cílem modulace QAM je efektivnější využití přenosového pásma a dostupného frekvenčního spektra nebo při zachování šířky pásma zvýšit přenosovou rychlost a to právě použitím dvou vzájemně nezávislých a fázově posunutých signálů.

QAM modulace můžeme rozdělit podle toho jaký je počet amplitudově – fázových stavů. Použitím více kanálů se ale stává signál taky náchylnějším na rušení a tím pádem je těžší identifikace symbolů. Proto využívání QAM modulací vyšších řádů vyžaduje taky větší odstup signálu od šumu Na obr.2.12 jsou znázorněny konstelační diagramy QAM modulací.

8QAM může nabývat 8 stavů, no v praxi se příliš nepoužívá, protože chybovost přenosu je téměř totožná jako u 16QAM, co je způsobeno obdélníkovou konstelací oproti čtvercové, jako je to u jiných typů QAM.

16QAM je QAM modulace nejnižšího řádu, která se v praxi využívá. Nabývá 16

stavů – jeden symbol obsahuje 4 bity.

32QAM nabývá 32 stavů – jeden symbol obsahuje 5 bitů.

64QAM nabývá 64 stavů – jeden symbol obsahuje 6 bitů[8].

2.3.3 Modulace využívající polarizační multiplex

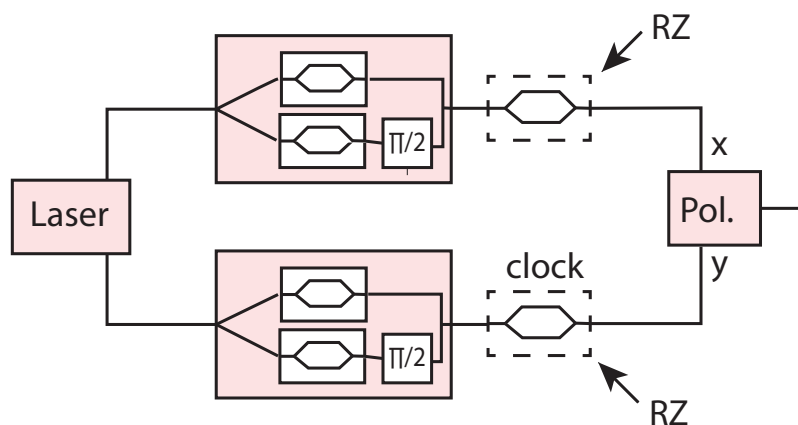
Vhodnou technikou pro zvýšení šířky pásma, resp. pro zvýšení přenosových rychlostí je kombinace polarizačního multiplexu a vhodné modulační techniky. Nejčastěji se v optických systémech využívají techniky založené na už popisované QPSK a 16QAM modulaci.

PM-QPSK

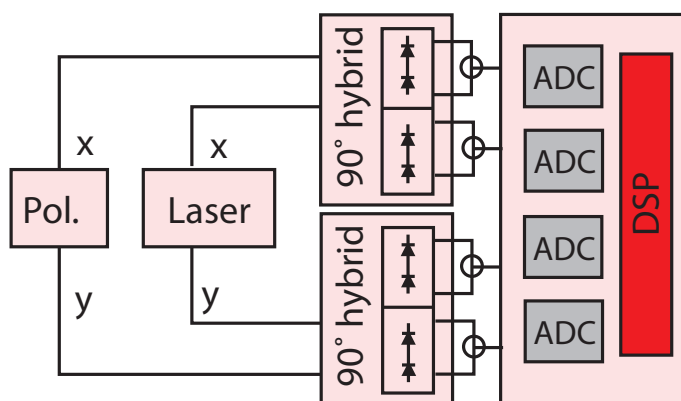
V optických koherentních přenosových systémech, které vyžadují přenosové rychlosti 100 Gbit/s je velmi rozšířená *Polarization Multiplexed Quadrature Phase-Shift Keying* (PM-QPSK). V tomto případě se informace o fázi přímo získává koherentním smícháním přijatého optického signálu se spektrální čarou optického lokálního oscilátoru (laseru). V přijímači je tzv. duální polarizační optický 90°-hybrid, který rozděluje přijatý signál na dvě ortogonálně polarizované složky, které následně kombinuje se světlem produkovaným laserem na čtyřech fotodiodách. Výsledkem jsou čtyři nezávislé elektrické signály, zkonvertované digitálně-analogovým převodníkem a zpracované *Digitální signálový procesor – Digital Signal Processor* (DSP). Přijímač má informaci o fázi a amplitudě signálu, přijatý signál může být jednoduše demultiplexován a lineární jevy jako například chromatická disperze kompenzovány v tzv. DSP. Na obrázcích 2.15 a 2.14 je blokově znázorněn vysílač a přijímač při PM-QPSK modulaci s koherentní detekcí. PM-QPSK modulace využívá často 50 GHz odstupy jednotlivých kanálů. Technika PM-QPSK je jednou z finančně nejefektivnějších metod pro přenos na velké vzdálenosti[8][23].

PM-OFDM-QPSK

Další komerčně využívanou modulací je *Polarization multiplexed - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - Quadrature Phase-Shift Keying* (PM-OFDM-QPSK), která využívá dvě 20 GHz vzájemně vzdálené nosné a nezávisle modulované PM-QPSK modulací. V tomto případě jsou ale vyžadovány až 2 páry 50 Gbit/s vysílačů a přijímačů. Obě modulace se využívají pro optický přenos o rychlosti 100 Gbit/s. V současnosti se výzkum věnuje možnostem ještě rychlejšího přenosu, 400 Gbit/s a potenciálně i víc než 1 Tbit/s, například s využitím flexibilních odstupů mezi kanály. Pro tyto rychlosti je už nejčastějším druhem modulace m-QAM vyšších řádů



Obr. 2.13: PM-QPSK vysílač[23].



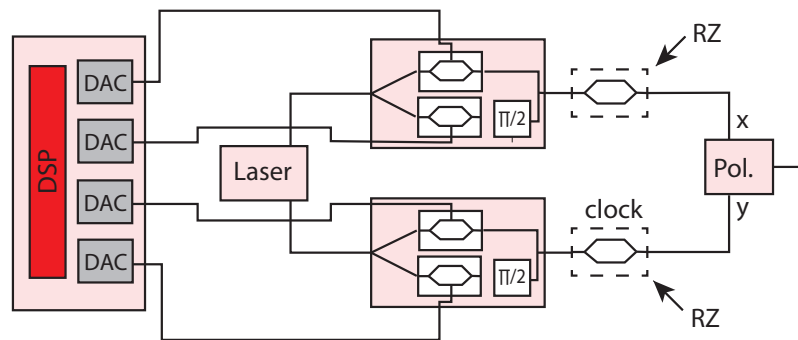
Obr. 2.14: PM-QPSK přijímač[23].

v kombinaci s polarizačním multiplexingem, díky kterému se počet přenášených bitů zdvojnásobí[8][23].

PM-16QAM

Generování PM-QAM signálu se obecně realizuje použitím paralelních PM-QPSK modulátorů, které jsou řízené binárními signály. Konkrétně u PM-16QAM se využívají modulátory dva, no různou kombinací je možné docílit také různé druhy m-QAM modulace. Se zvyšujícím se počtem symbolů se vzájemná vzdálenost symbolů zmenšuje, proto značně klesá i rozlišovací schopnost. Samotná realizace PM-16QAM systému vyžaduje na každé elektrodě 4-stupňový elektrický modulační signál. Využívá se buď kombinace dvou elektrických signálů s rozličnou amplitudou nebo digitální zpracování signálu (DSP). V porovnání s PM-QPSK vysílačem je potřebný laser s užší spektrální čarou. Přijímač je podobný jako u PM-QPSK modulací

(100 Gbit/s), no potřebné je vyšší rozlišení analogově-digitálního převodníku kvůli menší vzdálenosti mezi symboly. Na obr. 2.13 je schematicky zobrazen vysílač pro PM-16QAM modulaci využívající DSP[8][23].

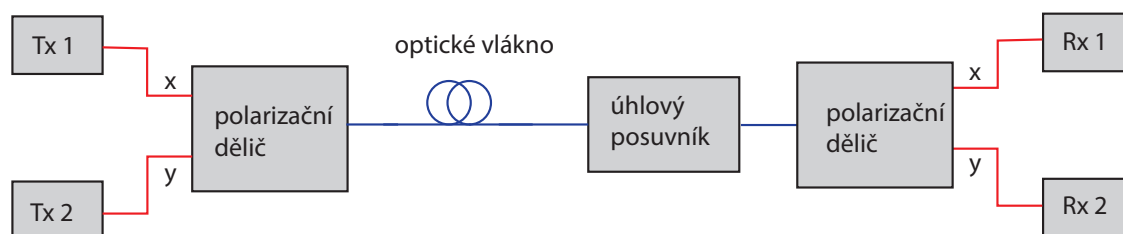


Obr. 2.15: PM-16QAM vysílač[23].

Při porovnání možností PM-QPSK a PM-16QAM modulací zjistíme, že přenosové rychlosti dosahuje PM-16QAM více než dvojnásobně, přenáší dvojnásobně více bitů na symbol (4 vs. 8). Výhodou PM-QPSK je naopak vyšší odolnost vůči rušení[23].

3 Realizace polarizačního multiplexu

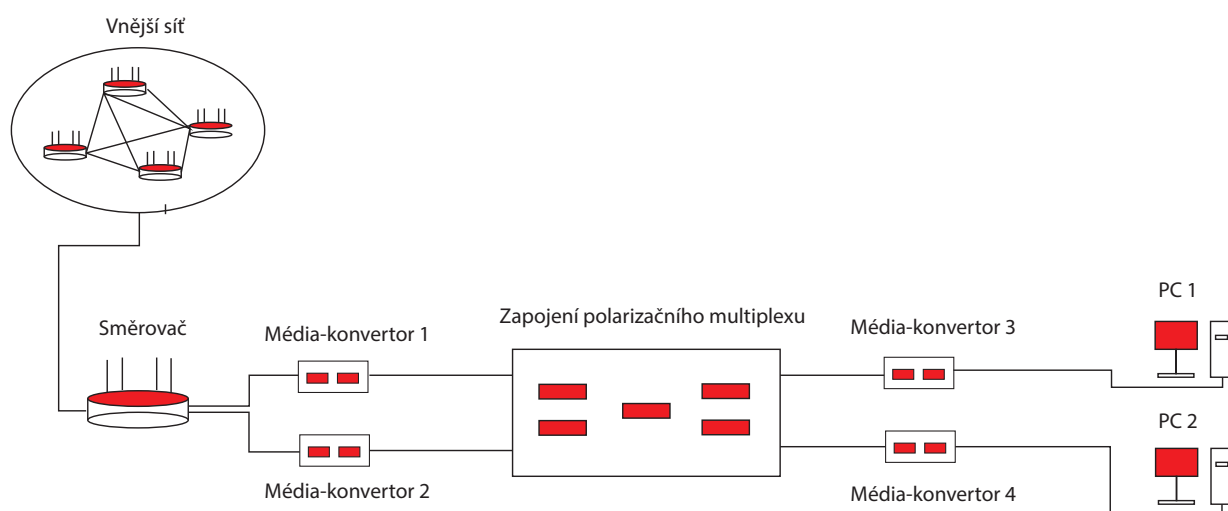
Měřicí pracoviště je realizované podle obecného schématu 3.1.



Obr. 3.1: Blokové schéma měřicího pracoviště

Ve skutečnosti je nutné zapojit víc optických členů, které zabezpečí funkčnost polarizačního multiplexu, také je potřebné připojení počítačů, pomocí kterých tuto funkčnost ověříme, případně změříme přenosové rychlosti. Dalším důležitým členem je polarimetr, resp. v našem případě dva různé polarimetry, které graficky zobrazí na Poincarého kouli polarizaci a její parametry. Všechny použité prvky jsou popsány v následující části.

Ze síťového pohledu je pracoviště zapojené podle schématu 3.2. Média-konvertory č.1 a č.2 jsou připojené do směrovače, který má konektivitu s vnější sítí, resp. se sítí UNOB. Na druhé straně měřicího pracoviště jsou do média-konvertorů č.3 a č.4 připojené PC 1 a PC 2, kterými ověřujeme schopnost dekódovat signál z jednotlivých polarizačních rovin.



Obr. 3.2: Zapojení pracoviště z pohledu sítě

Fotografie reálného zapojení měřícího pracoviště se nachází v příloze B.1 a B.2.

3.1 Síťové prvky v zapojení

3.1.1 Zdroj signálu

Zdrojem signálu ve schématu označeném jako Tx1 a Tx2 jsou média-konvertory značky TP-Link, model MC220L. Jedná se o zařízení, které umožňuje vzájemně propojit optické a metalické sítě tím, že konvertuje optický signál na elektrický, respektive opačně. Podporuje rychlosti až 1000 Mbit/s a je možné jej využít pro přenos na vzdálenost až 10 km u jednovlákenných optických kabelů nebo 0,55 km u mnohavlákenných. Konektor pro připojení metalické sítě je typu RJ45, pro připojení optického vlákna se využívá SFP slot s SFP modulem. V zapojení využíváme čtyři média-konvertory.

Do média-konvertorů bude připojen SFP (small form-factor pluggable) modul, malý



Obr. 3.3: Média-konvertor TP-Link MC220L[28]

vysílač/přijímač často využívaný v telekomunikacích a dalších datově-komunikačních aplikacích. Model který v laboratoři využíváme je taktéž od firmy TP-Link - model TL-SM321. Ten je napájen přímo z média konvertoru a pracuje s vlnovými délkami 1550 nm pro vysílání a 1310 nm pro přijímání. Podporuje standard 1000Base-BX pro přenos přes jedno vlákno optického vedení. Jelikož zdrojem záření u SFP modulů je laserová dioda vyzařující lineárně polarizované světlo, není potřeba použít další polarizátory.

3.1.2 Optická vlákna

Jedná se o SM vlákna splňující standard G.652D s FC konektory (více o standardu G.652D zde [27]).



Obr. 3.4: SFP modul TP-Link SM321[28]

3.1.3 Polarizační kontrolér

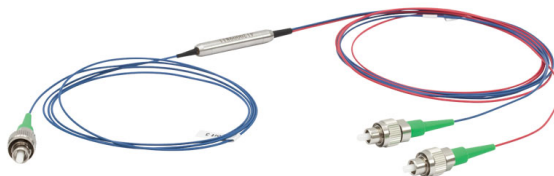
Pro natočení světla do požadované polarizační roviny využijeme polarizační kontrolér od firmy Thorlabs - model FPC561. Princip funkce je popsán v předchozí kapitole.



Obr. 3.5: Polarizační kontrolér[29]

3.1.4 Polarizační dělič

Dalším členem v zapojení je polarizační dělič Thorlabs -model PBC-1550PM-FC, kterého funkcí je navázat signál do optického vlákna.



Obr. 3.6: Polarizační dělič

3.1.5 Dělič výkonu

Abychom zachovali funkčnost polarizačního multiplexu a zároveň mohli měřit signál pomocí polarimetrů, potřebujeme signál rozdělit děličem výkonu. Využíváme k tomu typ PMC 1550-90B-FC, který výkon rozdělí v poměru 90 ke 10.

3.1.6 Polarimetry

Pro porovnání využíváme dva typy polarimetrů. Prvním je model značky Thorlabs - PAX5710IR3-T. Jedná se o starší typ, který se skládá ze dvou částí. První je modul s kartou a druhou je samotná měřící sonda viz obr.3.7. Měřící sonda obsahuje rotující destičky, polarizátor a fotodiodu. Na základě aktuálního úhlu potom transformuje vstupní polarizaci. Tento polarimetr umožňuje měřit jak stav, tak i stupeň polarizace a zobrazit je v grafickém prostředí ve formě bodů na Poincarého kouli, nebo formě Stokesových parametrů.

Druhým polarimetrem, který využíváme je novější model PAX1000IR2/M od firmy Thorlabs, který integruje obě části staršího typu do měřící sondy v mnohem menších rozměrech. Měření polarizace je založeno podobně jako v předchozím typu na rotujících destičkách s větší vzorkovací frekvencí až 400 vzorků/s oproti 333 vzorků za sekundu. Výsledky se dají zobrazit v grafickém rozhraní na Poincarého kouli, jako polarizační elipsa, graf, nebo ve formě tabulky. Na obr.3.7 je samotný polarimetr.



Obr. 3.7: Polarimetr typu PAX5710IR3 (vlevo) a PAX1000IR2/M (vpravo)[29]

3.1.7 Úhlový posuvník

Po překonání trasy bude znovu polarizace upravena pomocí úhlového posuvníku od firmy Newport - model FPR1-C1A s optickým členem FPH-CA4. V dalším polarizačním děliči bude rozdělena do dvou přijímačů, které tvoří stejný model média-konvertorů jako u vysílačů.



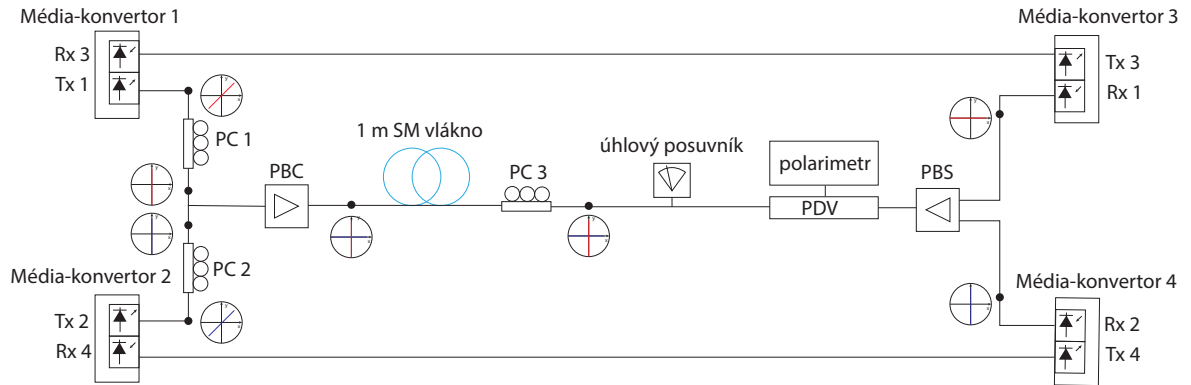
Obr. 3.8: Úhlový posuvník Newport FPR1-C1A s optickým členem FPH-CA4[30]

3.2 Ověření funkčnosti polarizačního multiplexu a měření krátké trasy

Měřící pracoviště s polarizačním multiplexem je zapojené podle obr. 3.9. Média-konvertory 1 a 2 jsou v obecném schématu zapojení 3.1 reprezentovány vysílači Tx 1

Tab. 3.1: Přehled optických členů

Prvek	Model
4x Média-konvertor	TP LinkMC220L
4x SFP modul	TP Link TL-SM321
2x Polarizační dělič	PBC 1550 PM-FC
3x Polarizační kontrolér	Thorlabs FPC561
1x Dělič optického výkonu	PMC 1550-90B-FC
1x Polarimetr	PAX5710IR3
1x Polarimetr	PAX1000IR2/M
1x Úhlový posuvník	Thorlabs FPR1-C1A
1x Optický člen	Thorlabs FPH-CA4



Obr. 3.9: Zapojení pro referenční měření

a Tx 2 a média-konvertory 1 a 2 přijímače Rx 1 a Rx 2. Do každého z nich je zapojený SFP modul generující lineárně polarizované světlo, polarizace je znázorněná v příslušných bodech na obrázku 3.9. Nejdřív jsme pomocí polarizačních kontrolérů dosáhli lineární vertikální polarizaci obou větví, čehož jsme docílili manipulací s jednotlivými destičkami polarizačních kontrolérů připojených za média-konvertory a ověřili polarimetrem. Obě polarizační roviny se následně navázaly do polarizačního děliče, který je zapojen ve funkci umožňující navázání do jednoho vlákna, a který signál z Tx 2 otočí do stavu LHP. Poté signál vstoupí do jednojádrového vlákna o délce 1 m.

Po přechodu vláknem je nutné znovu ověřit polarizaci, proto jsme museli vždy jeden z média-kontrolérů vypojit, protože polarimetr zobrazuje jenom tu část signálu, která je silnější. Po vypojení MC2 tedy jediným signálem procházejícím trasou byl signál z MC1, který měl být polarizován do stavu LHP, čehož jsme docílili korekcí polarizačním kontrolérem č.3. Na to abychom mohli bez rozpojování měřit parametry polarizace je za polarizační kontrolér zapojený polarizační dělič výkonu (v

obrázku 3.9 označen PDV), který oddělí 10% světelného paprsku a přesměruje ho do polarimetru. Bližší popis funkce polarizačního děliče a polarizačního kontroléru je v kapitole věnující se polarizačnímu multiplexu 2.2.3. Grafické prostředí softwaru polarimetru PAX5710IR3, který jsme používali pro většinu měření je na obr.3.11

Nejdůležitější součástí zapojení je úhlový posuvník, který je zapojený mezi PC 3 a polarizační dělič výkonu. Posuvník má po svém obvodu stupnici po 7,5 stupních. Jehož otáčením do kladné i záporné strany jsme docílili natočení polarizačních rovin o přesně daný úhel. Zároveň jsme při každém natočení rovin pomocí funkce ping ověřovali na obou počítačích konektivitu s vnější sítí. Pokud byla konektivita zachována, věděli jsme, že média-kontrolér zapojený před daným PC je schopný dekodovat z polarizační roviny signál. Pokud byl úhel natočení posuvníku, resp. polarizační roviny příliš velký, došlo ke ztrátě schopnosti signál dekodovat a tím pádem ke ztrátě spojení s vnější sítí. Měření jsme provedli do úhlu 75° . To nám zaručilo, že k ztrátě konektivity určitě přijde ve všech zapojeních s různými délkami vláken. Původním záměrem bylo provést i měření s vláknem otočeným o 180° , docházelo ale k výraznému fyzickému ohybu čímž by mohlo dojít k poškození vlákna. Kromě konektivity jsme zaznamenali i stupeň polarizace signálu a výkon signálu. Hodnoty pro zapojení s vláknem o délce 1 m jsou v následující tabulce 3.2. Předposledním členem zapojení je polarizační dělič, tentokrát zapojený ve funkci rozdělení do jednotlivých polarizačních rovin, kde se paprsek rozdělí a vstoupí do média-konvertorů č.3 a 4.

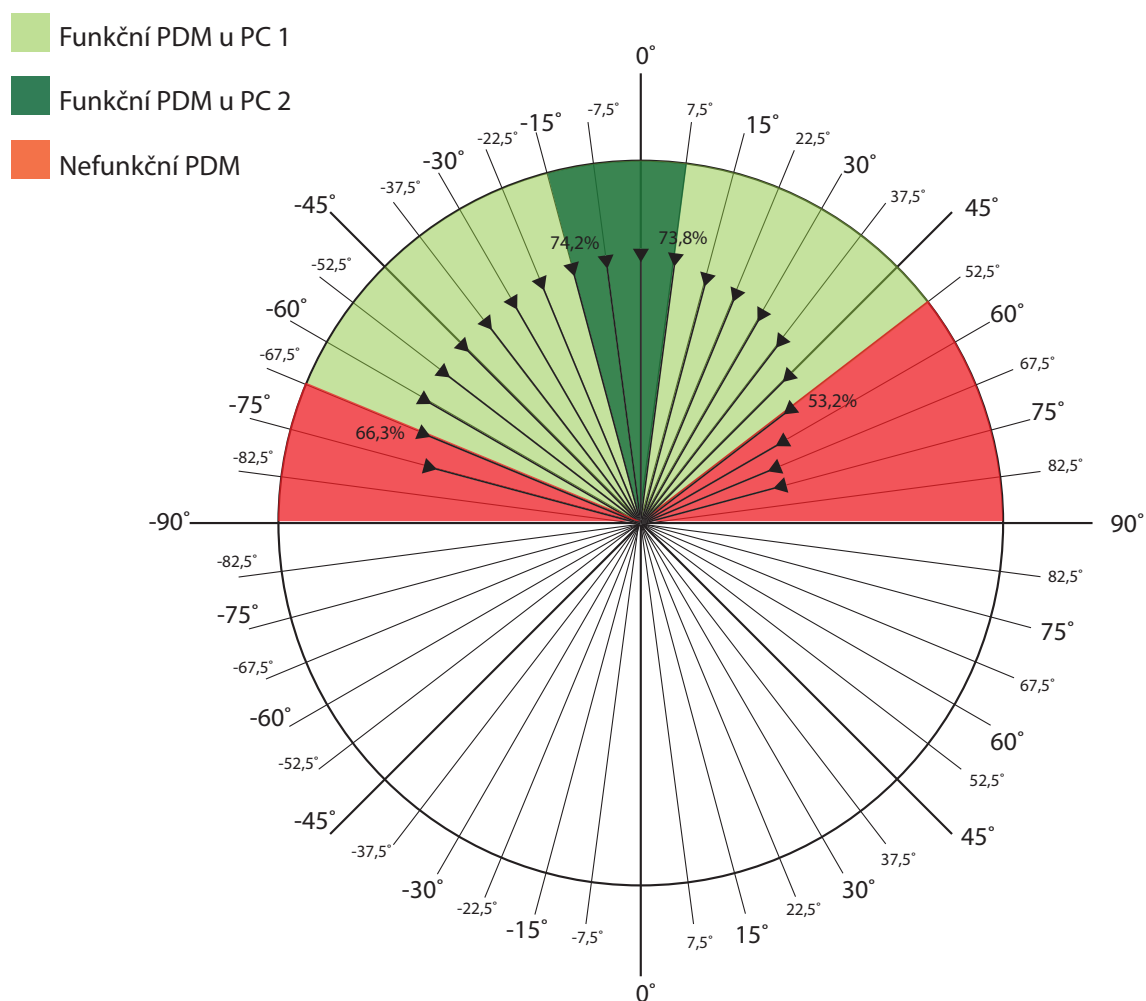
Kromě polarimetru typu PAX5710IR3 jsme pro porovnání výsledků použili i polarimetr typu PAX1000IR2/M3.12.

Graficky můžeme výsledky reprezentovat obr. 3.10. Z tabulky a grafu můžeme vidět velký rozdíl ve schopnosti dekodování signálu polarizačních rovin. Počítač č.1 resp. polarizační rovina se stavem LHP vykazuje mnohem větší oblast, ve které je možné z ní ještě signál dekodovat - úhel od $-67,5^\circ$ až $+52,5^\circ$, přičemž u druhé polarizační roviny je to pouze -15° až $+7,5^\circ$ stupňů. Stupeň polarizace, při kterém docházelo ke ztrátě konektivity u PC 1 je 61,8% resp.46,5%. U PC 2 to bylo už 70,2% resp. 69,4%. Druhý polarimetr vykazoval řádově podobné výsledky a charakteristiky s mírně nižšími hodnotami, což může být způsobeno odlišnou kvalitou měřicího přístroje nebo mírně odlišnou kalibrací. Graf s hodnotami pro tento polarimetr je zobrazen v příloze práce -A.1

Kromě tolerančního pole je v grafu na jednotkové kružnici vyznačen i stupeň polarizace. Délka úsečky ukončená bodem odpovídá procentuální hodnotě DOP, přičemž 100% je velikost poloměru jednotkové kružnice.

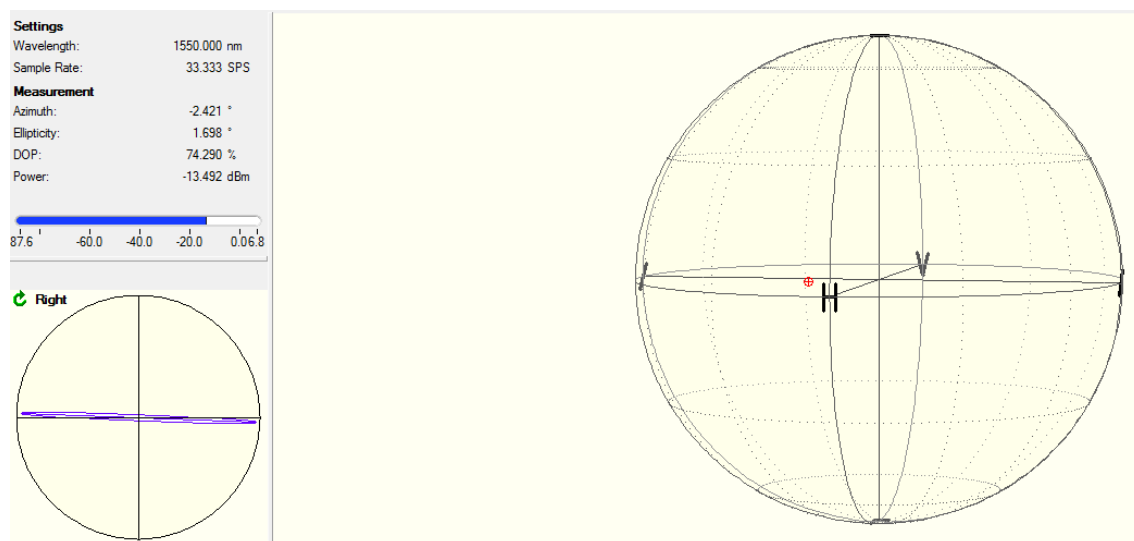
Tab. 3.2: Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 1 m

polarimetr	PAX5710IR3		PAX1000IR2/M			
úhel natočení[°]	DOP[%]	výkon[dB]	DOP[%]	výkon[dB]	funkční PDM 1.roviny	funkční PDM 2.roviny
-75	61,8	-14,4	57,1	-15,4	ne	ne
-67,5	66,3	-14,1	60,3	-15,3	ano	ne
-60	69,7	-13,8	63,9	-15,2	ano	ne
-52,5	69,9	-13,8	64,0	-15,2	ano	ne
-45	70,6	-13,7	65,8	-15,1	ano	ne
-37,5	71,0	-13,8	69,2	-15,2	ano	ne
-30	71,8	-13,6	70,0	-14,9	ano	ne
-22,5	73,2	-13,4	70,2	-14,4	ano	ne
-15	74,2	-13,9	71,4	-14,8	ano	ano
-7,5	74,5	-13,4	71,3	-14,7	ano	ano
0	75,7	-13,3	73,7	-14,7	ano	ano
7,5	73,8	-13,7	71,9	-14,0	ano	ano
15	71,3	-14,2	69,4	-14,7	ano	ne
22,5	69,8	-14,1	66,9	-14,9	ano	ne
30	67,9	-13,7	63,2	-15,2	ano	ne
37,5	64,8	-13,9	61,0	-15,5	ano	ne
45	58,9	-14,2	59,5	-15,5	ano	ne
52,5	53,2	-14,4	56,9	-15,7	ano	ne
60	46,5	-14,5	50,6	-15,9	ne	ne
67,5	41,5	-14,6	44,6	-15,8	ne	ne
75	41,4	-14,6	44,6	-15,4	ne	ne

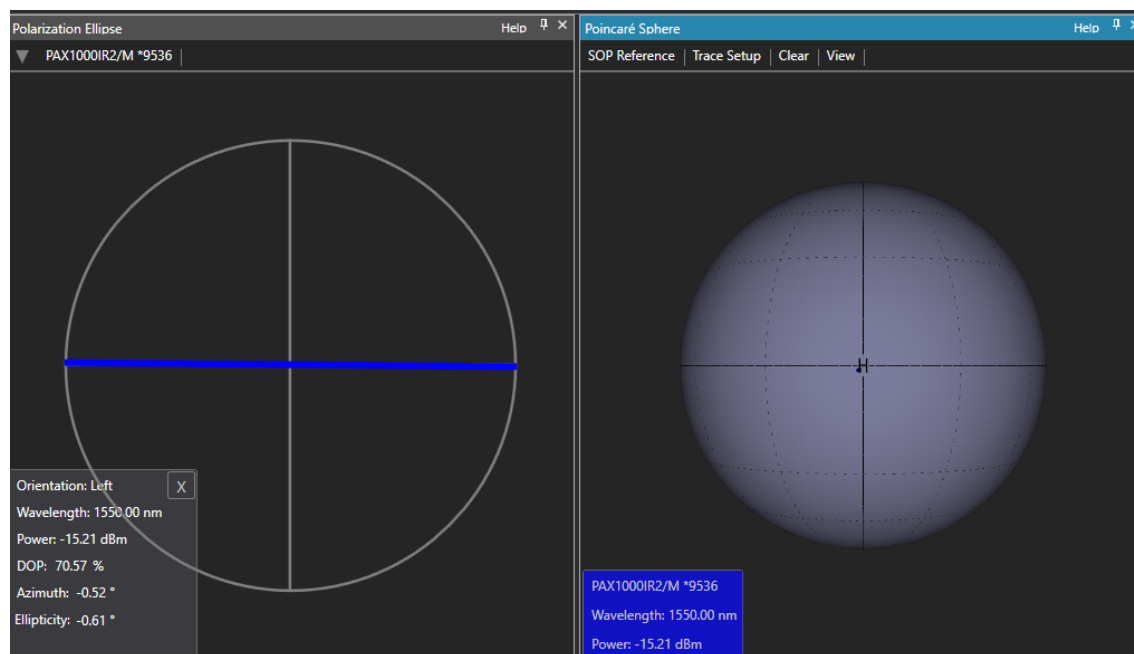


Obr. 3.10: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 1 m

K měření používáme dva polarimetry od značky Thorlabs - modely PAX5710IR3 a PAX1000IR2/M. Na obrázku 3.11 je grafické prostředí softwaru k polarimetru PAX5710IR3. V pravé části je zobrazený stav polarizace na Poincarého kouli - LHP. V levé části jsou potom konkrétní měřené hodnoty DOP, výkonu a přesná poloha stavu polarizace a ve spodní části zobrazení polarizační roviny. Na obrázku 3.12 je grafické prostředí softwaru k polarimetru PAX1000IR2/M, které jsme nastavili do podobného rozložení jako předchozí případ.



Obr. 3.11: Grafické prostředí PAX5710IR3 a LHP



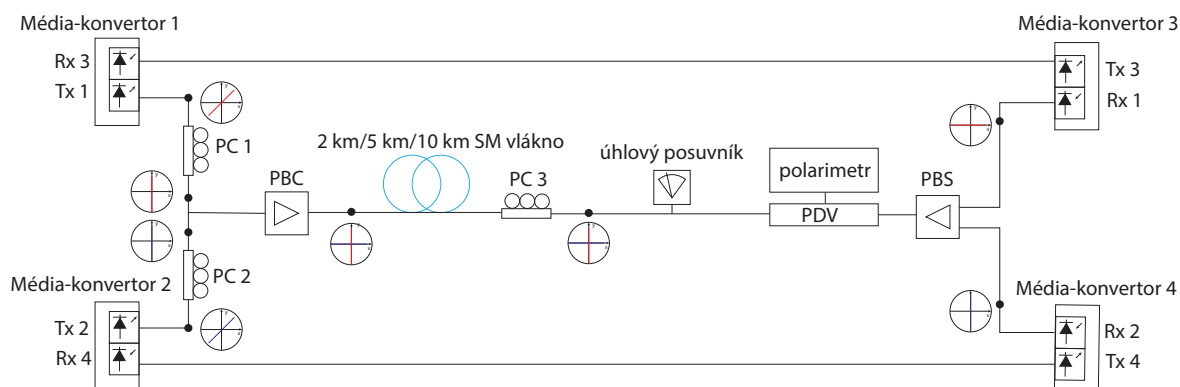
Obr. 3.12: Grafické prostředí PAX1000IR2/M a LHP

3.3 Měření dlouhých tras

Pro měření dlouhých tras jsme využili 3 různé SM vlákna o délkách:

- 2 km
- 5 km
- 10 km

Zapojení pro měření dlouhých tras je principiálně stejné, rozdílem je pouze mnohem větší délka vláken viz obr. 3.13



Obr. 3.13: Zapojení pro měření s SM vláknem o délce 2 km/5 km/10 km

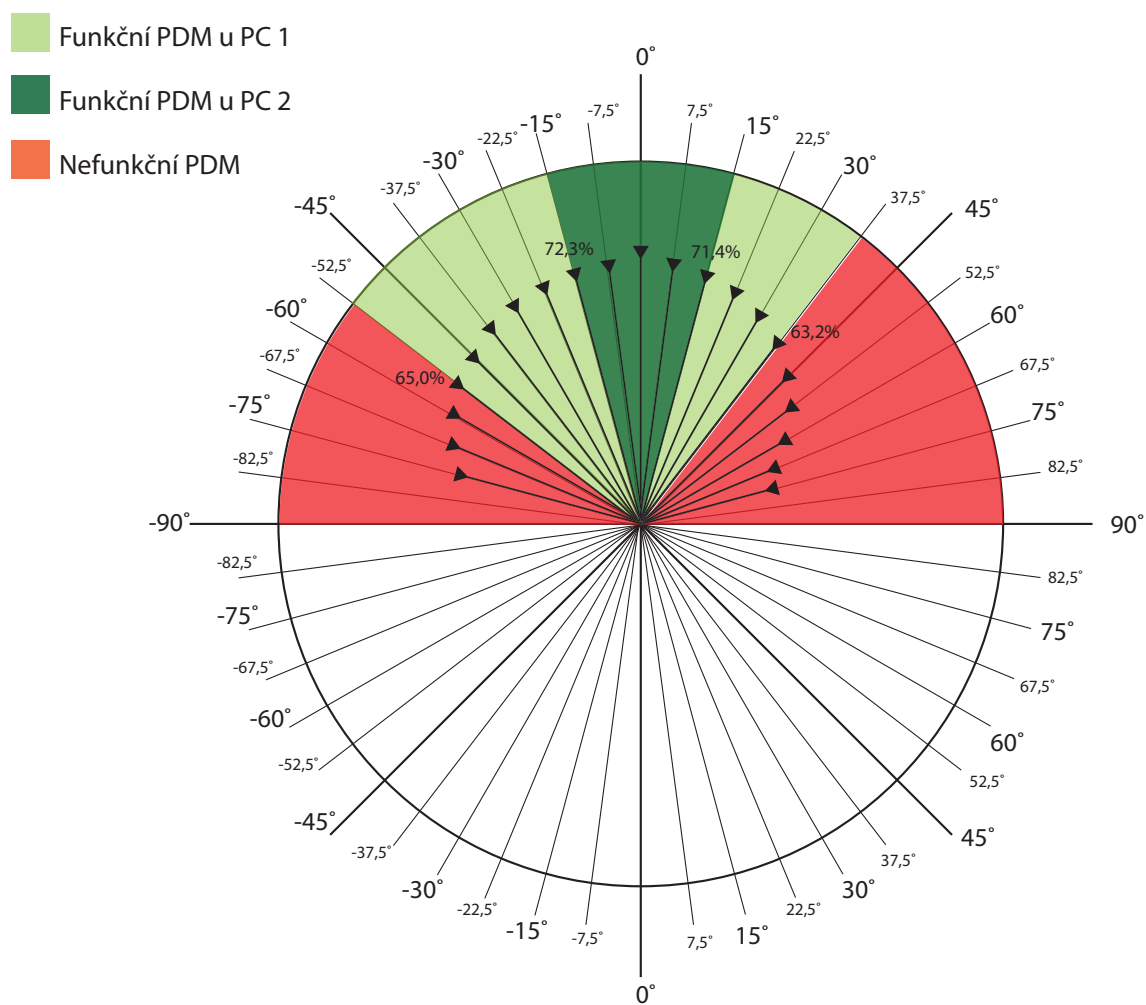
3.3.1 Zapojení pro trasu o délce 2 km

Po ověření funkčnosti polarizačního multiplexu a změření tolerančního pole pro krátkou trasu jsme zapojili SM vlákno značky Mikrokom o délce 2000 m. Podobně jako v předchozím případě bylo nejdříve nutné nastavit polarizaci obou větví na lineární vertikální pomocí manipulací s destičkami polarizačního kontroléru 1 a 2. Po sloučení obou větví do jedné v PBC signál vstoupil do vlákna o délce 2000 m, po kterém byla polarizace znovu upravená polarizačním kontrolérem č.3. Úhlovým posuvníkem jsme otáčeli vláknem v a proti směru osy x čímž jsme otáčeli i obě polarizační roviny. Měření jsme prováděli opět s využitím dvou polarimetrů pro ověření správnosti výsledků. Předpokládaným výsledkem bylo zúžené toleranční pole multiplexu z důvodů větší délky vlákna, větším vlivem různých parazitních vlastností jako dvojlom, disperze, nebo větším výskytem nečistot ve vlákně.

Výsledky měření, v tabulce 3.3, předpoklady potvrdily. V grafu 3.14 vidíme, že toleranční pole polarizačního multiplexu s 2 km trasou se zmenšilo z obou stran o 15° , v případě PC 1 došlo ke ztrátě konektivity s vnější sítí už při natočení o $-52,5^\circ$ resp. $+37,5^\circ$. Naopak u PC 2 došlo k mírnému zvětšení tolerančního pole, média-konvertor před PC 2 byl schopný signál dekodovat v rozmezí -15 až $+15$ stupňů. Může to být způsobeno tím, že stupeň polarizace byl v případě vlákna o délce 1 m mírně vyšší

(přibližně 2%) a tím pádem docházelo k menšímu rušení signálů obou rovin, ale také nepřesností signálu, jelikož úhlový posuvník neumožňoval úplně přesné nastavování hodnot.

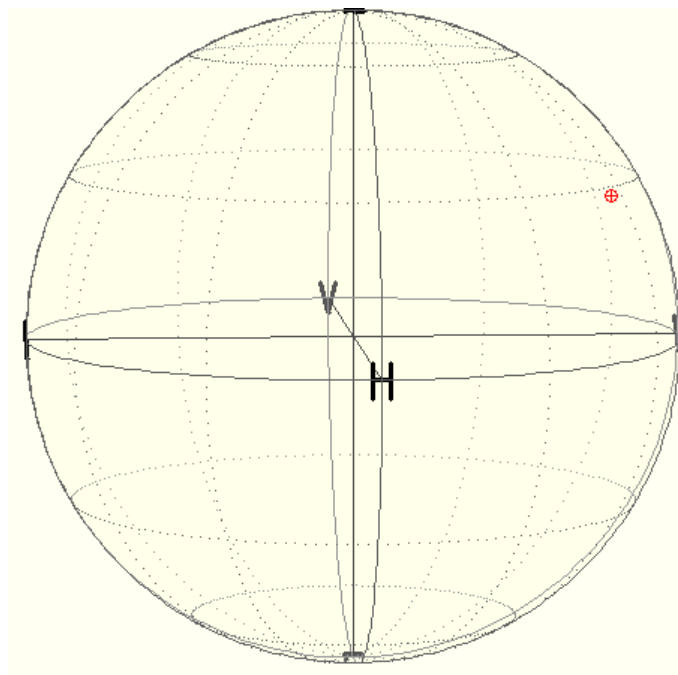
Stupeň polarizace byl při hraničních hodnotách tolerančního pole 65,0% resp. 63,2%. Měření s polarimetrem PAX1000IR2/M vykazovalo v porovnání s měřením pro 1 m vlákno vůči polarimetru PAX5710IR3 menší odchylky - 65,2% resp. 60,7%. Graf s hodnotami pro druhý polarimetr se nachází v příloze práce A.2.



Obr. 3.14: Toleranční pole a DOP trasy s vlákem o délce 2 km

Tab. 3.3: Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 2 km

polarimetr	PAX5710IR3		PAX1000IR2/M			
úhel natočení[°]	DOP[%]	výkon[dB]	DOP[%]	výkon[dB]	funkční PDM 1.roviny	funkční PDM 2.roviny
-75	53,3	-15,6	53,8	-17,0	ne	ne
-67,5	57,8	-15,3	58,1	-16,6	ne	ne
-60	61,0	-15,2	61,9	-16,5	ne	ne
-52,5	65,0	-14,9	65,2	-16,2	ano	ne
-45	66,4	-15,0	66,8	-16,1	ano	ne
-37,5	69,1	-14,7	69,0	-16,1	ano	ne
-30	70,2	-14,5	70,0	-15,9	ano	ne
-22,5	71,4	-14,0	70,1	-15,5	ano	ne
-15	72,3	-13,9	71,8	-15,1	ano	ano
-7,5	72,6	-13,9	71,4	-15,1	ano	ano
0	75,9	-13,7	73,5	-14,9	ano	ano
7,5	73,0	-14,4	71,8	-15,0	ano	ano
15	71,4	-14,0	69,5	-15,7	ano	ano
22,5	69,5	-14,5	66,4	-15,9	ano	ne
30	66,8	-14,2	63,1	-15,9	ano	ne
37,5	63,2	-14,4	60,7	-15,9	ano	ne
45	57,9	-15,0	59,6	-16,0	ne	ne
52,5	53,0	-14,7	54,9	-15,7	ne	ne
60	46,0	-14,9	48,9	-15,8	ne	ne
67,5	40,8	-15,4	43,2	-16,7	ne	ne
75	38,8	-15,0	42,1	-16,8	ne	ne



Obr. 3.15: Stav polarizace ve vláknu - maximální úhel $-52,5^\circ$ při kterém je PM u PC 1 funkční

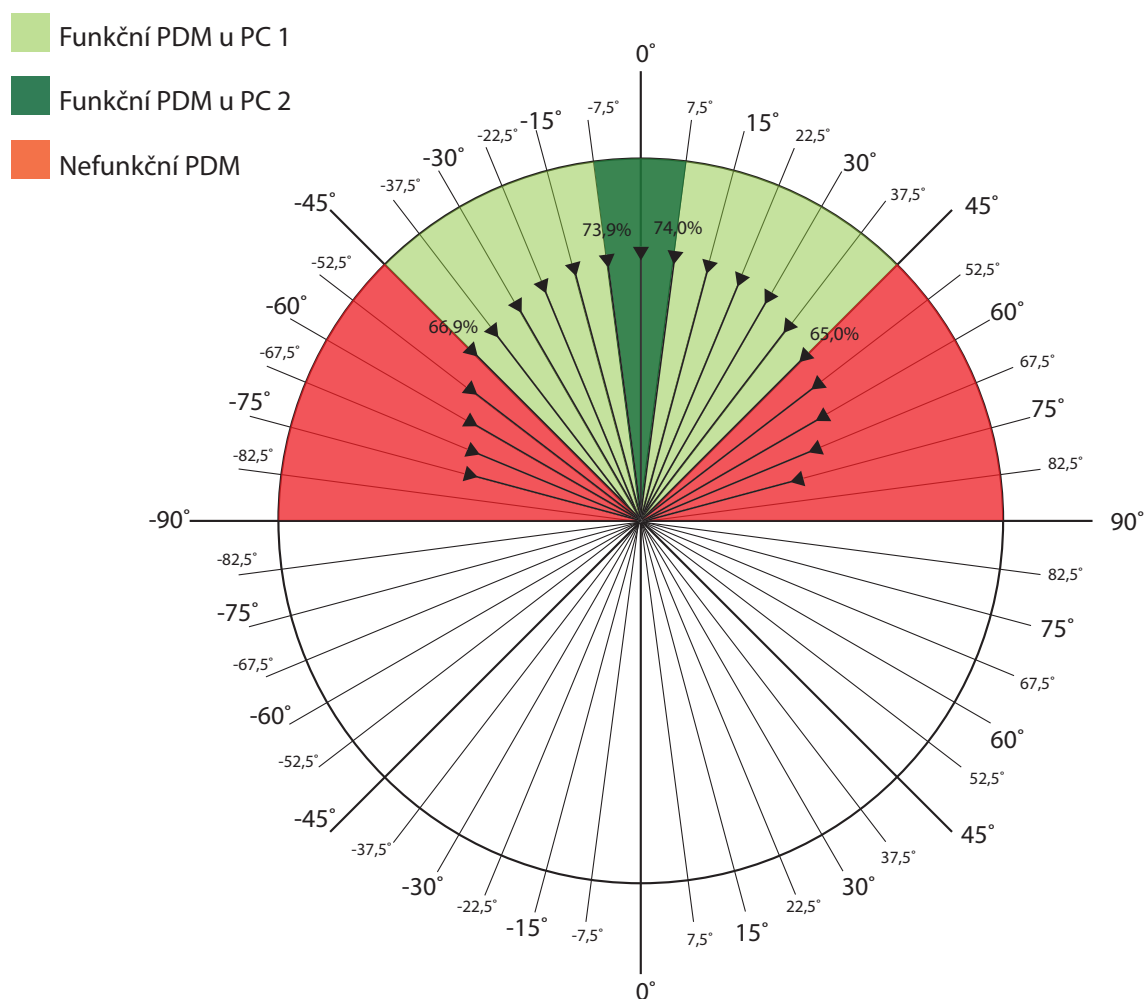
3.3.2 Zapojení pro trasu o délce 5 km

Zapojení je identické se zapojením pro trasu s 2 km vláknem - 3.13. Naším cílem bylo ověřit funkčnost polarizačního multiplexu pro co pokud největší délku vlákna. Původním předpokladem bylo, že v případě 10 km trasy přijde k příliš velkému omezení tolerančního pole, možná i k nefunkčnosti multiplexu, proto jsme nejdříve provedli měření pro vlákno o délce 5000 m. V tomto měření jsme využili obyčejné jednojádrové vlákno typu G657.A2 od firmy SQS - vláknová optika. Výsledky měření jsou v následující tabulce 3.4, resp. v grafu 3.16.

Můžeme pozorovat, že v případě horizontální polarizační roviny, tedy signálu, který dekóduje média-konvertor připojený do PC 1 došlo k posunu tolerančního pole o $+7,5$ stupně. Hraniční hodnoty pole byly v tomto případě -45 a $+37,5$ stupně. Toleranční pole pro vertikální polarizační rovinu, resp. pro PC 2 je užší o 15° . Hraniční hodnoty, při kterých ještě nedocházelo ke ztrátě konektivity byly pouze $-7,5^\circ$ a $+7,5^\circ$. Tento výsledek byl očekávaný, ale žádný resp. malý rozdíl v prvním LHP je poměrně překvapivý, odpovídá ale výraznému poklesu resp. nárůstu hodnot DOP. Výsledky mohou být způsobené odlišnými vlastnostmi vlákna, jeho vnitřní struktury, jelikož se jedná o odlišného výrobce. Hraniční hodnoty DOP při zachování funkčnosti PM byly pro první počítač 66,9% (68,7% podle druhého polarimetru) a 65,0% (66,8%) viz tab.3.4. Pro druhou polarizační rovinu jsou to hodnoty 73,9% (75,1% podle druhého polarimetru) a 74,0% (74,5%) viz grafy A.3

Tab. 3.4: Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 5 km

polarimetr	PAX5710IR3		PAX1000IR2/M			
úhel natočení[°]	DOP[%]	výkon[dB]	DOP[%]	výkon[dB]	funkční PDM 1.roviny	funkční PDM 2.roviny
-75	50,4	-15,3	52,2	-16,0	ne	ne
-67,5	51,1	-16,7	62,3	-17,7	ne	ne
-60	55,8	-15,2	56,7	-16,1	ne	ne
-52,5	60,7	-15,0	61,2	-15,7	ne	ne
-45	66,9	-15,3	68,7	-15,9	ano	ne
-37,5	67,9	-16,6	69,1	-17,6	ano	ne
-30	69,8	-14,9	70,7	-15,8	ano	ne
-22,5	70,9	-15,8	71,4	-15,8	ano	ne
-15	73,4	-16,2	75,1	-17,0	ano	ne
-7,5	73,9	-15,4	75,1	-16,6	ano	ano
0	74,6	-14,1	75,9	-15,3	ano	ano
7,5	74,0	-14,1	74,5	-15,2	ano	ano
15	73,5	-14,1	75,3	-15,3	ano	ne
22,5	72,5	-15,3	73,7	-16,4	ano	ne
30	70,8	-14,3	71,5	-15,2	ano	ne
37,5	67,8	-14,9	68,3	-16,1	ano	ne
45	65,0	-14,3	66,8	-15,6	ano	ne
52,5	62,5	-14,6	63,7	-15,9	ne	ne
60	58,7	-14,9	59,4	-16,0	ne	ne
67,5	53,0	-15,0	53,5	-16,2	ne	ne
75	46,0	-15,2	47,8	-16,3	ne	ne



Obr. 3.16: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 5 km

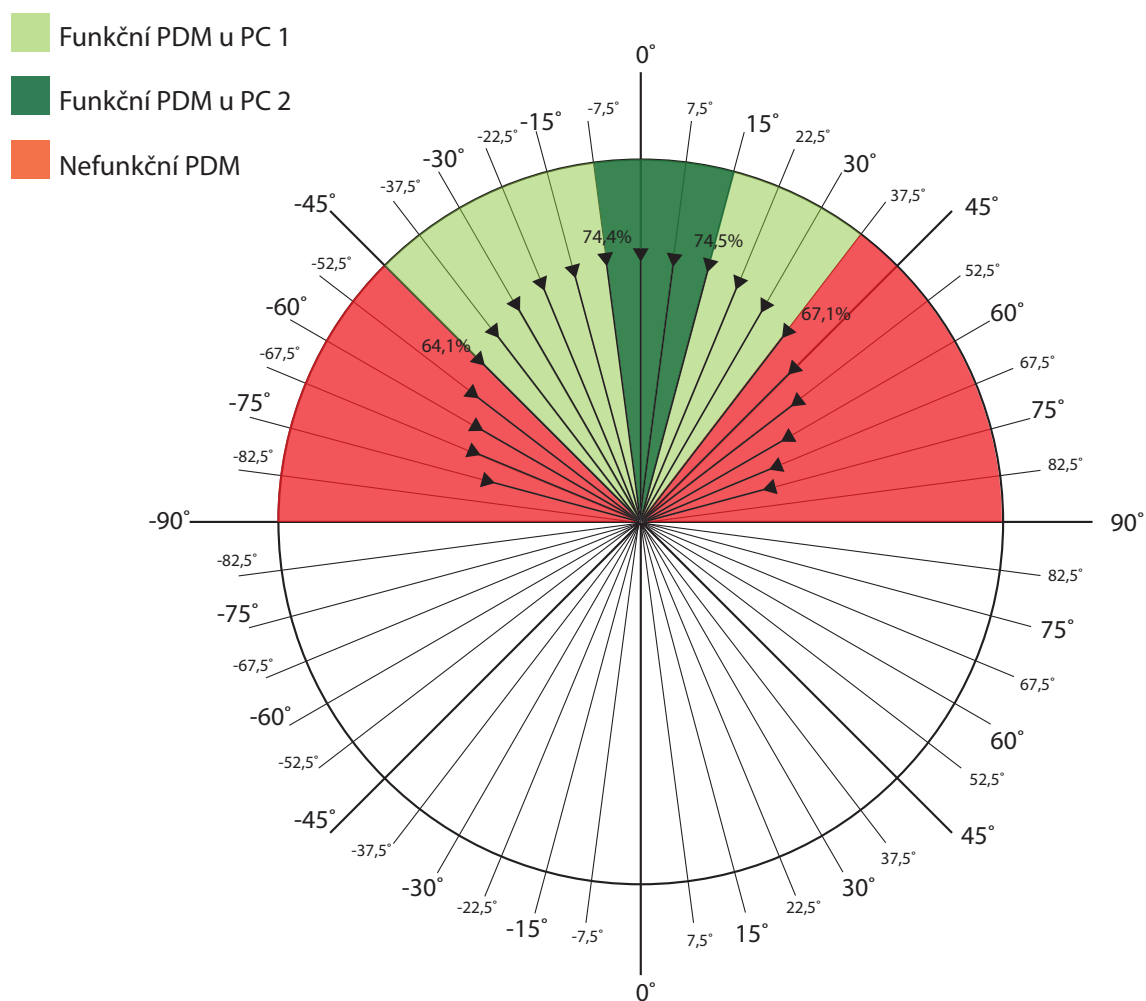
3.3.3 Zapojení pro trasu o délce 10 km

Poslední provedeným měřením bylo měření s trasou o délce 10 km. Zapojení zůstalo stejné -3.13, kromě výměny vlákna za typ G657.A2 od firmy SQS - vláknová optika. Jedná se o obyčejné jednovidové o délce 10000 m. Větší vlákno jsme k dispozici neměli. Předpokládaným výsledkem měření bylo menší toleranční pole nebo dokonce nefunkčnost celého systému. Výsledky jsou zaznamenány v následující tabulce 3.5a v grafu 3.17.

Podle výsledků je zřejmé, že systém funkční zůstal, toleranční pole je menší, ale pouze o 15 stupňů a to v rozmezí -45° až 30° pro horizontálně polarizovanou rovinu. Stupeň polarizace v hraničních polohách byl 64,1% (podle druhého polarimetru 64,2%) a 69,8% (68,9%). V případě vertikálně polarizované roviny se překvapivě toleranční pole mírně rozšířilo na úhel od $-7,5^\circ$ do 15° . Stupeň polarizace v hraničních polohách byl 74,4% (podle druhého polarimetru 74,5%) a 74,5% (75,2%). Zvětšení mohlo být způsobené pouze nepřesností měření, jelikož v hraničních polohách sta-

Tab. 3.5: Výsledky měření pro trasu s vláknem o délce 10 km

polarimetr	PAX5710IR3		PAX1000IR2/M			
úhel natočení[°]	DOP[%]	výkon[dB]	DOP[%]	výkon[dB]	funkční PDM 1.roviny	funkční PDM 2.roviny
-75	45,5	-16,8	44,9	-17,2	ne	ne
-67,5	51,0	-16,7	50,9	-17,2	ne	ne
-60	53,4	-15,3	52,3	-16,4	ne	ne
-52,5	59,6	-16,4	58,9	-17,3	ne	ne
-45	64,1	-16,2	64,2	-17,2	ano	ne
-37,5	67,2	-16,6	67,1	-17,6	ano	ne
-30	70,7	-16,0	68,1	-16,8	ano	ne
-22,5	72,2	-15,8	69,8	-16,6	ano	ne
-15	72,8	-16,2	70,2	-17,0	ano	ne
-7,5	74,4	-15,4	74,5	-16,8	ano	ano
0	75,0	-15,3	75,7	-16,1	ano	ano
7,5	74,0	-15,6	76,0	-16,4	ano	ano
15	74,5	-15,2	75,2	-16,6	ano	ano
22,5	72,8	-15,3	71,2	-16,2	ano	ne
30	69,8	-15,5	68,9	-15,9	ano	ne
37,5	67,1	-15,7	68,2	-16,2	ne	ne
45	60,6	-16,0	64,3	-16,9	ne	ne
52,5	55,4	-16,3	58,6	-17,1	ne	ne
60	47,9	-16,5	50,0	-17,3	ne	ne
67,5	41,6	-16,6	43,2	-17,8	ne	ne
75	38,1	-16,7	41,3	-18,1	ne	ne



Obr. 3.17: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 10 km

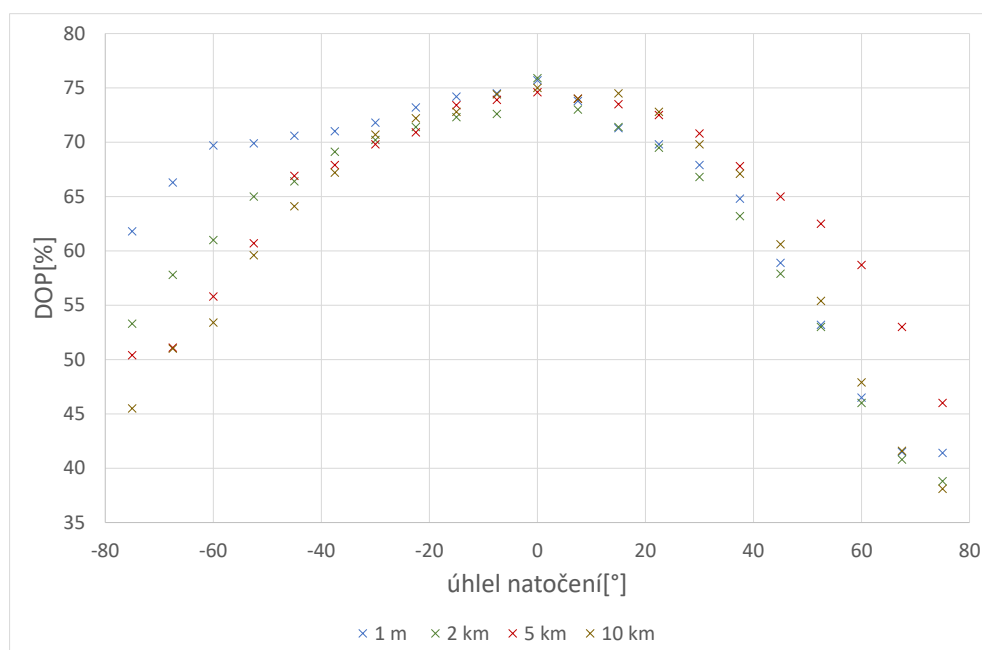
čila malá nepřesnost v nastavení úhlu, která ovlivnila schopnost resp. neschopnost média-konvertoru dekodovat signál.

Celkově se systém s polarizačním multiplexem projevil jako robustní, i při délce vlákna 10 km fungoval přenos signálu v jedné polarizační rovině v rozmezí 75 stupňů natočení roviny, ve druhé to bylo vždy minimálně 15 stupňů. Grafy s výsledky měření druhým polarimetrem se nachází v příloze A.4.

3.4 Zhodnocení výsledků

Na obr.3.18 a 3.19 jsou v grafu zobrazené hodnoty DOP v závislosti na úhlu natočení pro všechny měřené trasy. Podle naměřených hodnot prvním polarimetrem můžeme říct, že k výpadku konektivity PC 1 s vnější sítí došlo když stupeň polarizace klesl pod úroveň v průměru 60,77% při natočení roviny v záporném směru a 56,87% v kladném směru. Pro polarimetr typu PAX1000IR2/M byly tyto hodnoty pro záporný směr 59,77% resp. 59,55% pro kladný. V případě počítače č. 2 došlo k neschopnosti dekodovat signál při poklesu DOP pod průměrnou hodnotu 72,70% pro záporný směr a 71,83% pro kladný. Měřením druhým polarimetrem jsme získali výsledky 71,4% pro záporný a 70,58% pro kladný směr.

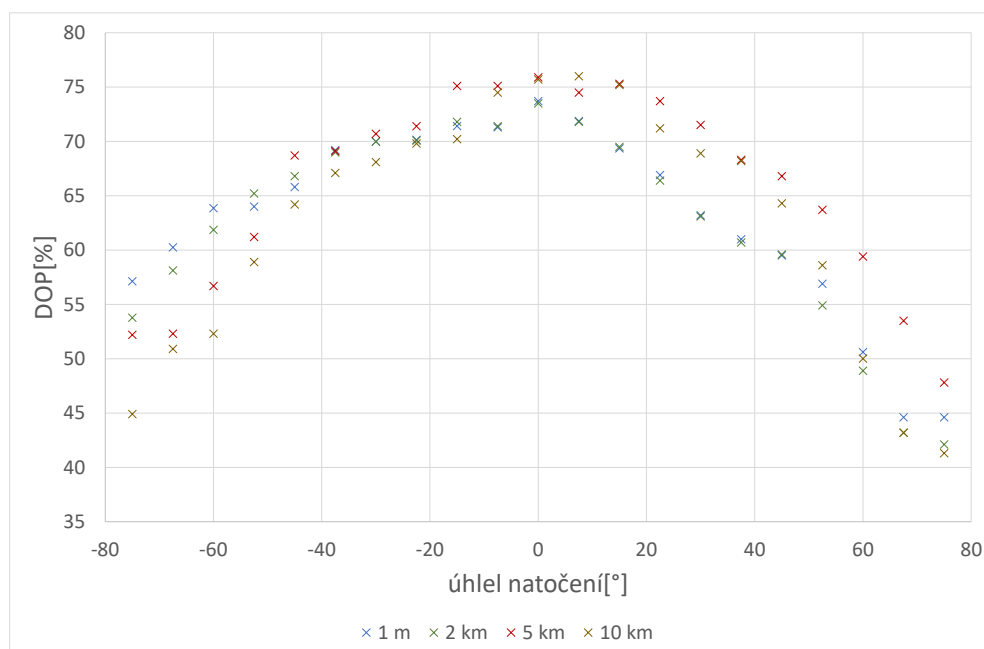
Výrazně odlišná hodnota minimálního DOP, potřebného k správné funkci PDM u obou počítačů resp. polarizačních rovin může být způsobená různými faktory, například přítomností dvojlomu ve vláknu, kdy jsou z důvodu odlišných materiálových vlastností odlišné indexy lomu obou rovin. To způsobí odlišnou fázovou rychlost šíření signálu v polarizačních rovinách a ovlivní polarizační stav vlny. Dalším faktorem mohou být různé druhy přeslechů mezi polarizačními rovinami, které signál ovlivní tak, že je nemožné signál už správně dekodovat.



Obr. 3.18: Závislost DOP na úhlu natočení pro PAX5710IR3

Odlišné výsledky pro dvě polarizační roviny byly poměrně překvapivé, ale dokazují tím citlivost na různé parazitní vlastnosti. Docházelo k nim ale pouze při natáčení polarizačních rovin, při stabilní poloze, kdy se roviny nenatočily byl polarizační multiplex stabilní i pro velké vzdálenosti (10 km). Vliv na schopnost dekódovat signál a odlišit ho od signálu v druhé polarizační rovině může mít také typ použitého média-konvertoru.

Při dnešní výrazně narůstající poptávce po vysokých přenosových kapacitách, vysokých přenosových rychlostech a robustnosti síťové infrastruktury je využití polarizačního multiplexu velmi výhodné, zejména kvůli možnosti jeho nasazení už v existujících sítích, bez nutnosti fyzického zásahu. V kombinaci s vhodně zvoleným typem modulačních technik je možné dosáhnout několikanásobného zlepšení požadovaných parametrů.



Obr. 3.19: Závislost DOP na úhlu natočení pro PAX1000IR2/M

4 Závěr

Diplomová práce je rozdělena na několik částí, první popsala základy šíření světla, eliptickou, kruhovou a lineární polarizaci. Věnovala se také nezbytnému matematickému popisu parametrů polarizace s využitím Stokesových polarizačních parametrů, Muellerových matic a Jonesova maticového počtu.

Druhá část byla zaměřena na optický přenos a to zejména na rozdělení optických vláken, popis fyzikální jevů jako je dvojlom. Součástí je také podkapitola věnující se vláknům zachovávajícím polarizaci.

Následuje podkapitola o slučování kanálů v optických sítích, které nám efektivně a levně umožňuje zvyšovat přenosovou kapacitu optických tras. Jedná se hlavně o časový multiplex, vlnový multiplex a polarizační multiplex.

Poslední podkapitola se zabývá modulacemi v optických sítích, popisuje klíčování fázovým posuvem, kvadrurní amplitudovou modulaci. Následují 3 příklady často využívaných modulací využívajících polarizační multiplex - PM-QPSK, PM-OFDM-QPSK a PM-16QAM modulace.

Praktická část diplomové práce se věnuje realizaci polarizačního multiplexu v laboratoři a měření tolerančního pole v závislosti na různém úhlu navázání signálu do polarizačních rovin vlákna. Měření bylo provedeno pro čtyři různé délky vláken - 1 m, 2 km, 5 km a 10 km. Z měření jsme zjistili přesné hodnoty úhlů, při kterých byl polarizační multiplex funkční v obou polarizačních rovinách, případně kdy pouze v jedné a kdy v žádné. V případě krátké trasy o délce 1 m byla funkčnost PDM zachována v rozmezí -15° až $7,5^\circ$ pro obě roviny a $-67,5^\circ$ až 60° pro jednu polarizační rovinu. Pro delší 2 km trasu byla funkčnost zachována v rozmezí -15° až 15° pro obě roviny a $-52,5^\circ$ až $37,5^\circ$ pro jednu.

Dalším měřením jsme určili toleranční pole pro 5 km trasu. PDM byl funkční pro obě polarizační roviny v rozmezí pouze $-7,5^\circ$ až $7,5^\circ$, funkčnost v pouze horizontální rovině byla dosažena od úhlu -45° až 45° . Nejdelší trasa, pro kterou jsme měřili toleranční pole měla délku 10 km. Funkčnost PDM, resp. schopnost dekódovat přijatý signál byla zachována u obou polarizačních rovin od $-7,5^\circ$ do 15° a u pouze jedné roviny od -45° do 30° .

Úhlový posuvník umožnil měření pouze s přesností $7,5^\circ$, čímž mohlo docházet k malým nepřesnostem. Tím pádem byla nejmenší šířka tolerančního pole při zachování funkčnosti PDM v obou polarizačních rovinách v zapojení s vláknem o délce 5 km. Největší šířka tolerančního pole při funkčnosti PDM v obou rovinách byla v zapojení s 2 km vláknem. Pokud pozorujeme pouze LHP rovinu, kterou se přenášel signál do PC 1, jsou rozdíly mezi výsledky větší, nedochází tak ke zkreslení kvůli nepřesnosti úhlového posuvníku. Největší toleranční pole potom vykazuje zapojení s vláknem o délce 1 m a to 120° , potom zapojení s 2 km a 5 km vláknem a to 90° . Trasa o délce

10 km má toleranční pole nejužší - $82,5^\circ$. Určili jsme také průměrné hodnoty stupně polarizace, při kterých docházelo k výpadku funkčnosti PDM.

Práce ukazuje možnosti využití technologie polarizačního multiplexu z praktické stránky. Tím že ho je možné nasadit do stávajících sítí, lze docílit zdvojnásobení přenosové kapacity bez výrazných finančních investic. Současné vysokorychlostní optické sítě ho využívají zejména v kombinaci s vhodnou modulační technikou a umožňují přenosy při rychlostech řádově stovek Gbit/s a nízké latenci. Měřením pro trasy o délce 2 km, 5 km a 10 km jsme ověřili funkčnost PDM pro dlouhé trasy. Kombinace všech zmíněných vlastností jej dělá ideální technologií pro využití v metropolitních či univerzitních sítích, nebo v sítích pro medicínské systémy. Velmi vhodný je také pro trasy na velmi dlouhé vzdálenosti, například na transkontinentálních trasách uložených na dně oceánu, kde by byla pokládka nových vláken finančně velmi náročná. Využití najde také v přístupových sítích pro koncové uživatele, kterým tak zpřístupní přenosové rychlosti řádově v stovkách Mbit/s až jednotkách Gbit/s. Každoročně také stoupá počet uživatelů, čímž se zvyšují nároky na kapacitu, přenosové rychlosti atd.

Výzkum různých technologií multiplexingu a jevů, které mají na přenos signálu ve vlákně vliv, je proto velmi perspektivní. Do budoucna umožní uspokojit nároky pro stále narůstající množství zařízení v různých odvětvích. Tato práce může po malých úpravách sloužit i jako studijní pomůcka pro laboratorní výuku, protože názorně demonstrovuje principy šíření polarizovaného světla a činnost polarizačního multiplexu. Dále je možné rozšířit ji o výzkum vhodné modulační technologie v kombinaci PDM nebo například vlnový multiplex.

Literatura

- [1] COLLETT, E. *Field Guide to Polarization*. Spie Press, Washington USA, 2009. ISBN 0-8194-5868-6, [cit. 22. 10. 2018]
- [2] FUKA, J. HAVELKA, B. *Optická a atomová fyzika*. Státní pedagogické nakladatelství. [cit. 23. 10. 2018] Dostupné z URL: [<http://www.opto.cz/fuka_havelka/t048.html#TOC1>](http://www.opto.cz/fuka_havelka/t048.html#TOC1)
- [3] KLINKOVSKÝ, J. SPAČKOVÁ, Z. ZÁVADSKÁ, N. *Seznamte se s polarizací! [online]*. [cit. 23. 10. 2018] Dostupné z URL: [<http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2011/cd/prispevky/sbpdf/polarizace.pdf>](http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2011/cd/prispevky/sbpdf/polarizace.pdf).
- [4] ZACH, Č. SLOBODA, M. *Polarizace světla a její využití*. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT [cit. 24. 10. 2018]
- [5] COLLETT, E. *Polarized Light in fiber optics*. Spie Press, New Jersey USA, 2003. ISBN 9780819457615, [cit. 25. 10. 2018]
- [6] ŠIMÁK, P. *Vliv dvojlomu jednovídných optických vláken na činnost polarizačního multiplexu*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT [cit. 29. 10. 2018]
- [7] FOWLES, G. *Introduction to Modern Optics*. Dover Publications, INC., New York, 1989. ISBN 0-486-65957-7, [cit. 1. 11. 2018]
- [8] STOHL, J. *Optické koherentní přenosové systémy*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT [cit. 05. 11. 2018]
- [9] PASCHOTTA, R. *Fibers* [online]. [cit. 07. 11. 2018]. Dostupné z URL: [<http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/SMbands.html>](http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/SMbands.html).
- [10] FILKA, M. *Přenosová média* [online]. 2012. ISBN 978-80-214-4444-7, [cit. 07. 11. 2018]
- [11] AGILENT TECHNOLOGIES *Why LED is the preferred light source for multimode fiber attenuation measurement?* [online]. [cit. 07. 11. 2018]. Dostupné z URL: [<https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/LEDvsVCSEL.pdf>](https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/LEDvsVCSEL.pdf).
- [12] AGILENT TECHNOLOGIES *Why LED is the preferred light source for multimode fiber attenuation measurement?* [online]. [cit. 07. 11. 2018]. Dostupné z URL: [<http://application-notes.digchip.com/018/18-27176.pdf>](http://application-notes.digchip.com/018/18-27176.pdf).

- [13] HILLERKUS, D. *Single-Laser Multi-Terabit/s Systems* [online]. 2013, ISBN 978-80-214-4444-7, str. 89 [cit.07.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://books.google.cz/books?id=SLc6AwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sk#v=onepage&q&f=false>>.
- [14] Fosco.co *What is Birefringence and Beat Length?* [online]. [cit.08.11.2018] Dostupné z URL: <<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95042886-what-is-birefringence-and-beat-length>>.
- [15] DREXLER, P., FIALA, P. *Optical Fiber Birefringence Effects – Sources, Utilization and Methods of Suppression* [online]. Department of Theoretical and Experimental Engineering, Brno University of Technology, [cit.08.11.2018] Dostupné z URL: <<http://cdn.intechweb.org/pdfs/26783.pdf>>.
- [16] PASCHOTTA, R. *Polarization Beat Length* [online]. [cit.08.11.2018]. Dostupné z URL: <https://www.rp-photonics.com/polarization_beat_length.html>.
- [17] Fosco.co *What Are Polarization Maintaining Fibers?* [online]. [cit.09.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052422-what-are-polarization-maintaining-fibers>>.
- [18] FiberLabs Inc. *Polarization-Maintaining Fiber (PM Fiber, PMF)* [online]. [cit.09.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.fiberlabs-inc.com/glossary/polarization-maintaining-fiber/>>.
- [19] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid* [online]. 2003, approved 2013 [cit.10.11.2018]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I>>.
- [20] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid* [online]. 2012, [cit.10.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>>.
- [21] ŠIFTA, R. *Kvalita služeb v optických přístupových sítích*. Dizertační práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT [cit. 12.11.2018] Dostupné z URL: <<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/87302>>.

- [22] MAFKA, M. *Realizace vysokorychlostního přenosového kanálu s využitím polarizačních rovin šíření světla*. Diplomová práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT [cit. 12.11.2018] Dostupné z URL: <<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/102001>>.
- [23] LACH, E., IDLER, W. *Modulation formats for 100G and beyond* [online]. [cit. 16.11.2018] Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.2778&rep=rep1&type=pdf>>.
- [24] DREXLER, P. *Techniky potlačování dvojlomných jevů v optických vláknech* [online]. Habilitační práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT, 2010. ISBN 978-80-214-4164-4,[cit. 27.11.2018] Dostupné z URL: <<https://bit.ly/2TNOLf4>>.
- [25] GENERAL PHOTONICS CORPORATION *Polarization Crosstalk in PM Fiber* [online]. [cit. 28.11.2018]. Dostupné z URL: <<http://www.generalphotonics.com/downloads/techpubs/Polarization-Crosstalk-in-PM-Fiber.pdf>>.
- [26] KOKYO, INC. *Polarization Crosstalk* [online]. [cit. 28.11.2018]. Dostupné z URL: <<https://en.symphotony.com/fiber-lasers/polarization-crosstalk/>>.
- [27] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU *ITU-T G.652 (11/2016)* [online]. [cit. 8.12.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=13076>>.
- [28] TP-Link CZ *TP-Link CZ* [online]. [cit. 12.04.2019]. Dostupné z URL: <<https://www.tp-link.com/cz/>>.
- [29] Thorlabs *Thorlabs* [online]. [cit. 12.04.2019]. Dostupné z URL: <<https://www.thorlabs.com/>>.
- [30] Newport *Newport* [online]. [cit. 23.04.2019]. Dostupné z URL: <<https://www.newport.com/p/FPR1-C1A/>>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

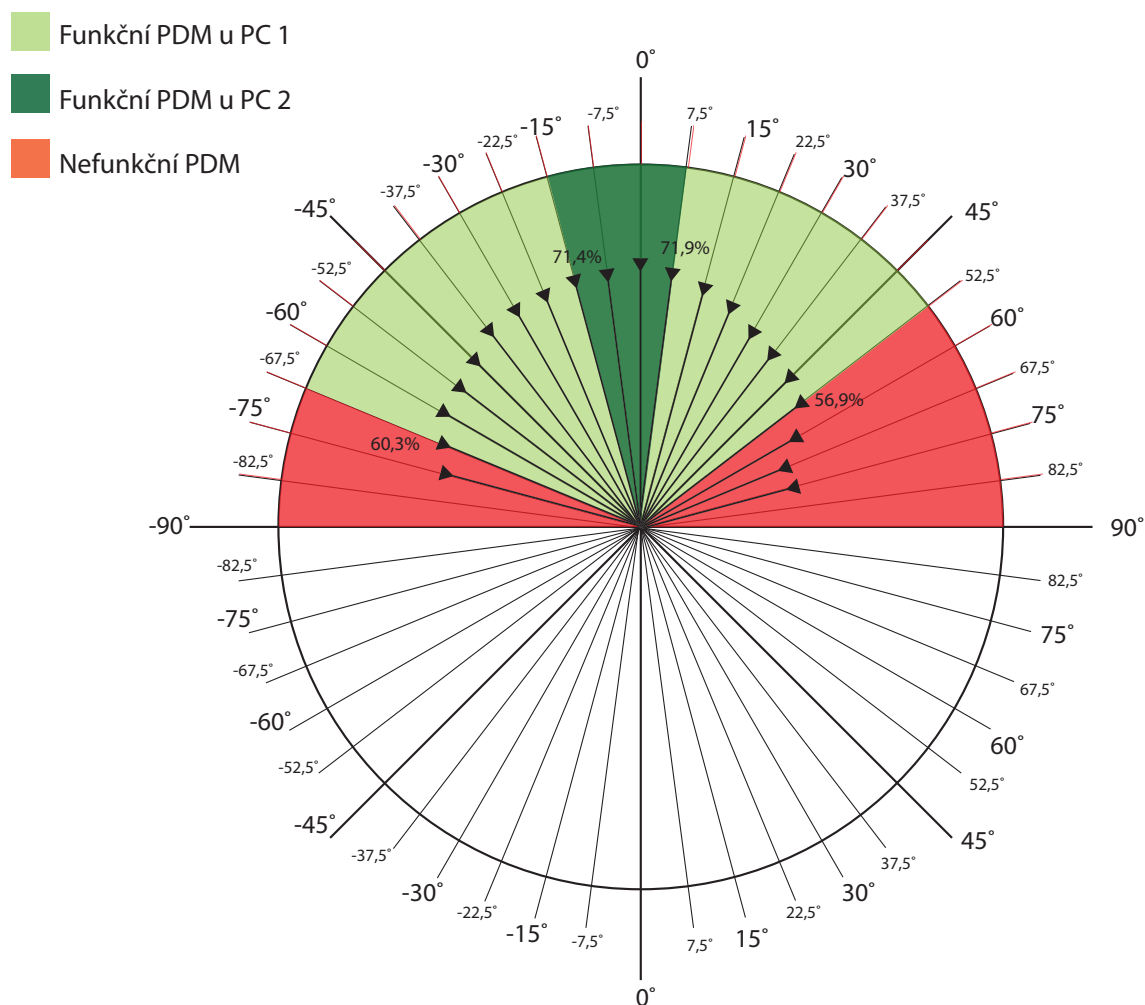
LHP	Lineárně horizontálně polarizované světlo – Linearly Horizontal Polarized Light
LHP	Lineárně vertikálně polarizované světlo – Linearly Vertical Polarized Light
LHP	Levotočivě polarizované světlo – Left Circularly Polarized Light
LHP	Pravotočivě polarizované světlo – Right Circularly Polarized Light
L+45P	Lineárně +45 polarizované světlo – Linearly +45 Polarized Light
L-45P	Lineárně -45 polarizované světlo – Linearly -45 Polarized Light
SOP	Stavy polarizace – States of Polarization
DOP	Stupeň polarizace – Degree of Polarization
LED	Light Emitting Diode
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
PMF	Polarizaci zachovávající vlákna – Polarization Maintaining Fiber
TDM	Time Division Multiplex
WDM	Wavelength Division Multiplex
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
FDM	Frequency Division Multiplex
PBS	Polarizační dělič – Polarization Beam Splitter
PC	Polarizační kontrolér – Polarization Controller
PSK	Klíčování fázovým posuvem – Phase-Shift Keying
QPSK	Kvadrurní klíčování fázovým posuvem – Quadrature Phase-Shift Keying
DQPSK	Diferenciální kvadrurní klíčování fázovým posuvem – Differential Quadrature Phase-Shift Keying
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation
DSP	Digitální signálový procesor – Digital Signal Processor
PM-QPSK	Polarization Multiplexed Quadrature Phase-Shift Keying
PM-OFDM-QPSK	Polarization multiplexed - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - Quadrature Phase-Shift Keying
SM	Jednovidová – Single-mode
PM	Polarizaci zachovávající – Polarization-maintaining
PDM	Polarizační multiplex – Polarization division multiplexing

Seznam příloh

A	Měření tolerančního pole s využitím polarimetru PAX1000IR2/M	65
A.1	Trasa s vláknem o délce 1 m	65
A.2	Trasa s vláknem o délce 2 km	66
A.3	Trasa s vláknem o délce 5 km	67
A.4	Trasa s vláknem o délce 10 km	68
B	Zapojení měřicího pracoviště	69
C	Obsah přiloženého CD	70

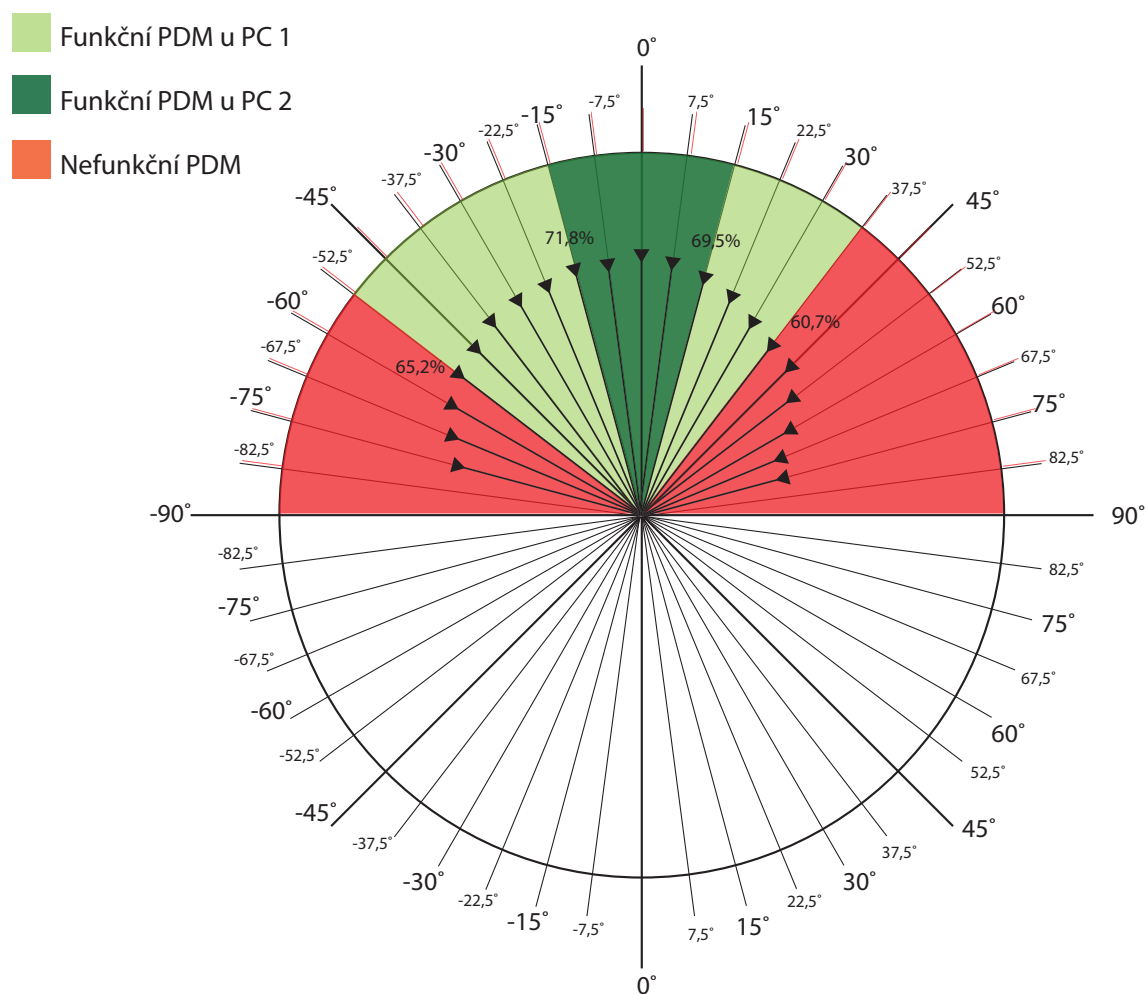
A Měření tolerančního pole s využitím polarimetru PAX1000IR2/M

A.1 Trasa s vláknem o délce 1 m



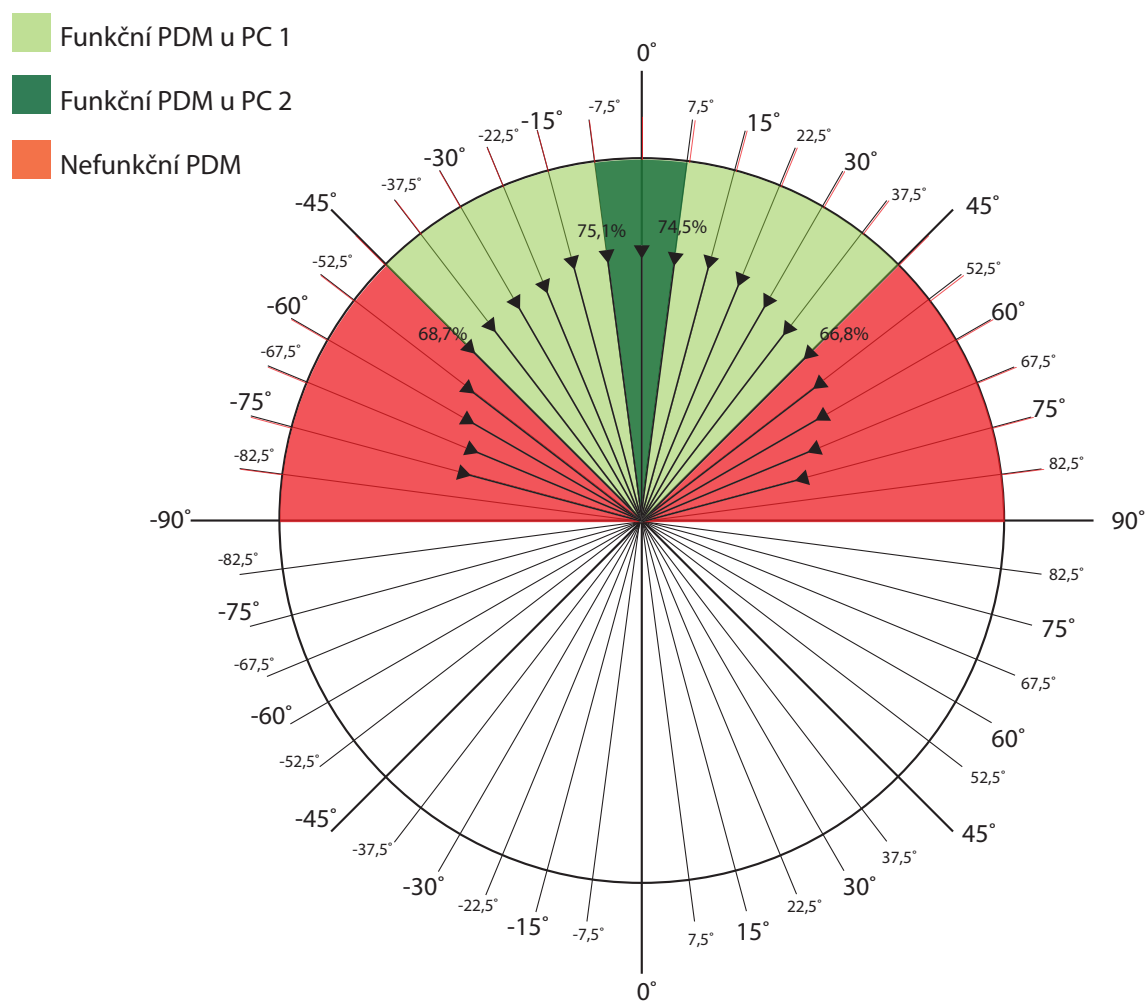
Obr. A.1: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 1 m

A.2 Trasa s vláknem o délce 2 km



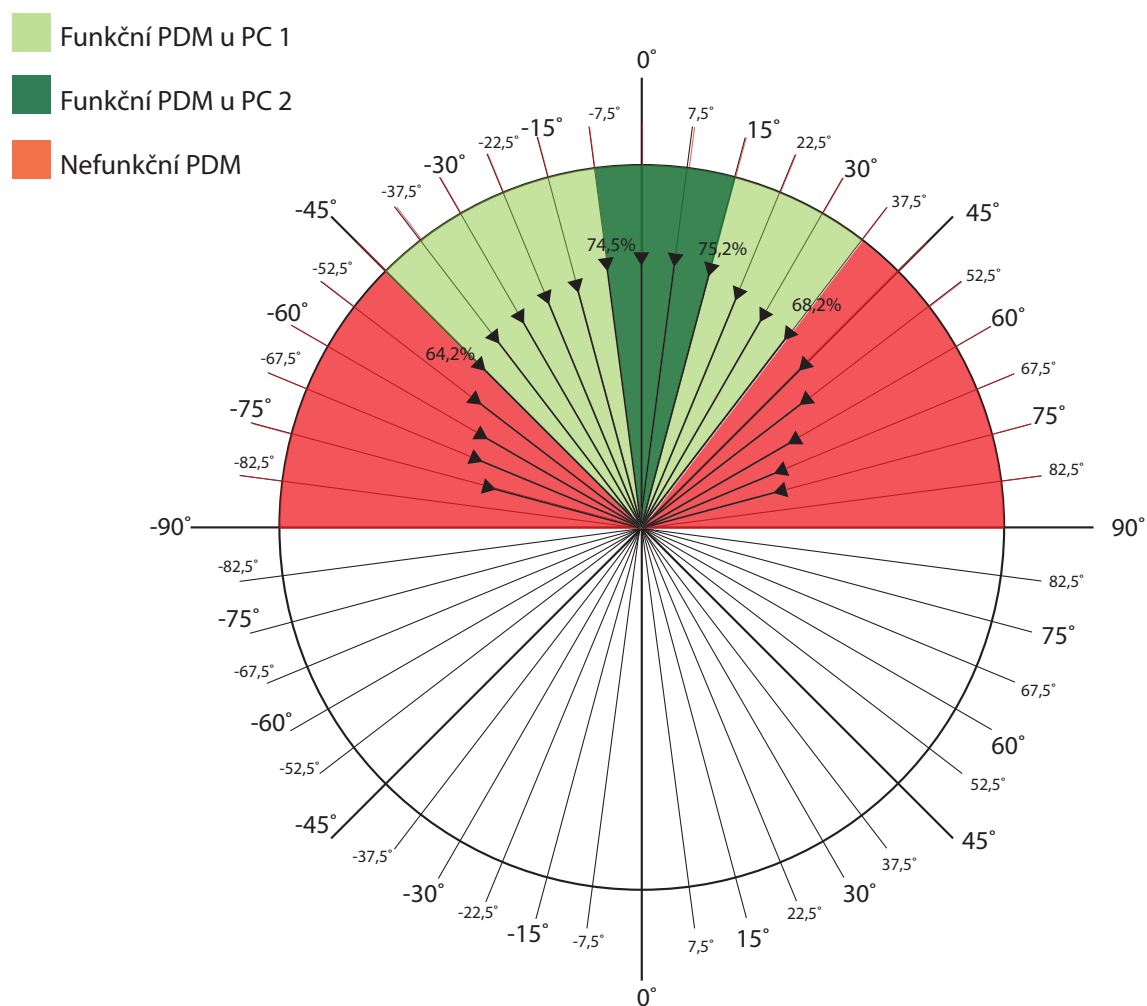
Obr. A.2: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 2 km

A.3 Trasa s vláknem o délce 5 km



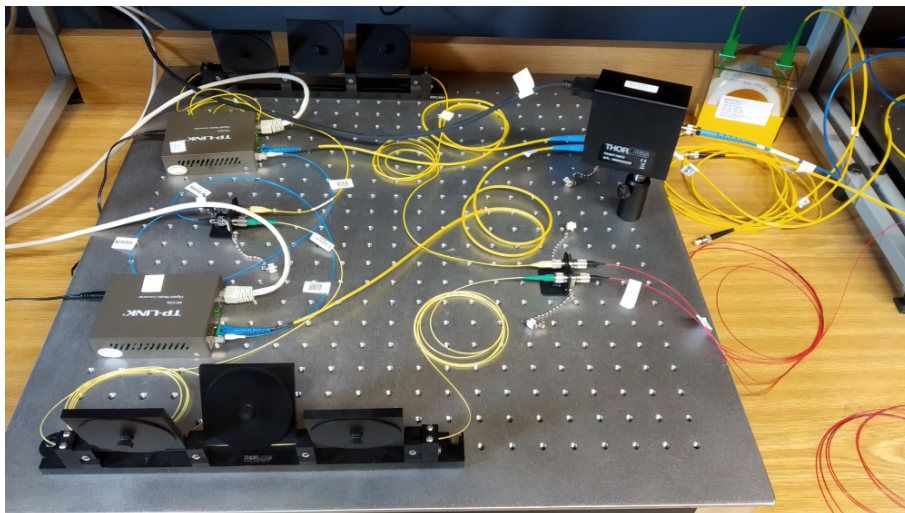
Obr. A.3: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 5 km

A.4 Trasa s vláknem o délce 10 km

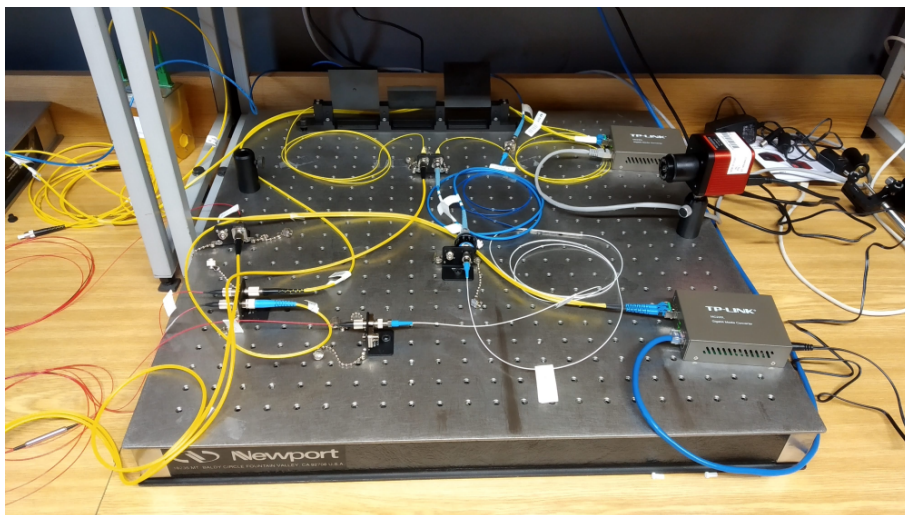


Obr. A.4: Toleranční pole a DOP trasy s vláknem o délce 10 km

B Zapojení měřicího pracoviště



Obr. B.1: Zapojení měřicího pracoviště



Obr. B.2: Zapojení měřicího pracoviště

C Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD se v hlavním adresáři nachází diplomová práce ve formátu pdf.
Ve složce obrázky se nachází fotky měřícího pracoviště.